

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**WILLIAN CONTERATO DA SILVA**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM  
CARREGADOR DE BATERIAS DE LÍTIO**

**Alegrete  
2024**

**WILLIAN CONTERATO DA SILVA**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM  
CARREGADOR DE BATERIAS DE LÍTIU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto

**Alegrete  
2024**



Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C761p Conterato, Willian Conterato Da Silva  
PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM CARREGADOR DE BATERIAS DE LÍTIO /  
Willian Conterato Da Silva Conterato.  
99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2024.

"Orientação: Felipe Bovolini Grigoletto Grigoletto".

1. Carregador de Baterias. 2. Baterias de Lítio. 3.  
Conversor Buck. I. Título.

**WILLIAN CONTERATO DA SILVA**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM CARREGADOR DE BATERIAS DE LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Dissertação defendida e aprovada em: 12 de julho de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **GUILHERME SEBASTIAO DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2024, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2024, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **FELIPE BOVOLINI GRIGOLETTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2024, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1480498** e o código CRC **F993CCF4**.

---

Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha gratidão mais sincera a todos que contribuíram para esta conquista. Para começar, gostaria de expressar minha gratidão aos meus queridos pais, Ariosto e Cláudia, cuja ajuda incondicional foi essencial ao longo desta jornada difícil. Obrigado pelo amor incondicional que sempre me deram e por sempre fazerem tudo o que podem para me manter aqui. Nada disso teria sido possível sem vocês. Amo você profundamente e sou muito grato por todos os sacrifícios e encorajamentos que você me deu ao longo dos anos.

Além disso, sou profundamente grato ao meu irmão, Murilo, pelo seu apoio incondicional, companhia constante e conversas. Minha perseverança dependeu de sua presença e encorajamento.

Meu sincero agradecimento aos amigos que fiz ao longo desta jornada acadêmica por sua colaboração, pelos dias e noites de estudo e pelas experiências que compartilhamos. A amizade de vocês foi um grande apoio quando as coisas estavam difíceis e como um motivo de celebração quando as coisas estavam indo bem.

Não poderia deixar de reconhecer e expressar minha gratidão mais sincera ao corpo docente da UNIPAMPA. Minha formação acadêmica e pessoal foi beneficiada por cada professor e professora que cruzou meu caminho. Em particular, ao professor Felipe Grigoletto, pela sua dedicação, paciência e disponibilidade para orientar e apoiar meu aprendizado e crescimento acadêmico. Sua orientação foi fundamental para minha formação como profissional e para meu progresso neste trabalho.

Acima de tudo, sou grato a Deus pela vida, pela saúde que me permitiu dedicar-me aos estudos e pela capacidade de perseverar diante dos desafios acadêmicos. Sua orientação e graça foram essenciais em cada passo desta jornada.

Obrigado a todos que estiveram ao meu lado, seja por meio de pensamentos, palavras de incentivo ou gestos práticos. Sem o amor, apoio e encorajamento de cada um de vocês, esta conquista não seria possível.

*“Não é a força mas a constância dos bons resultados que conduz os homens à felicidade.”  
(Friedrich Nietzsche)*

## RESUMO

O carregador de bateria é um dispositivo imprescindível atualmente, pois a carga de uma bateria é totalmente dependente desse dispositivo. Um carregador mal dimensionado, pode prejudicar a bateria, afetando sua vida útil, portanto, é necessário um dispositivo seja compatível com forma de carregamento. Isso demonstra que um carregador confiável é de suma importância para a longevidade da bateria, no entanto, mesmo um eficiente carregador pode estar exposto a ocasiões fora do normal. A bateria é um dispositivo que está em todos os locais nos dias de hoje, tais como celulares, carros, notebooks, onde todos esses aparelhos são dependentes de uma bateria para o seu funcionamento. Bateria de chumbo-ácido e de lítio são os principais tipos de baterias que estão no mercado, sendo aplicada em diversas áreas. A topologia escolhida é baseada no conversor CC-CC Buck, onde este tipo de aplicação torna-se interessante por suas características de diminuir a tensão de entrada e aumentando continuamente a sua corrente, sendo assim, um ponto interessante, tratando-se de um carregador de baixa potência. Além de disso, a topologia apresentada possui um volume e peso reduzidos e um baixo custo, pelo fato de não possuir muitos componentes em sua estrutura em si. O projeto dos dispositivos, bem como as malhas de controle de corrente e tensão são apresentados em detalhes neste trabalho. Experimentalmente foi utilizada uma bateria de chumbo ácido e lítio na qual foi analisado cada uma das etapas de carregamento.

**Palavras-chave:** Baterias de lítio. Conversor Buck. Carregador.

## ABSTRACT

The battery charger is an essential device nowadays, as the charging of a battery is entirely dependent on this device. An improperly sized charger can harm the battery, affecting its lifespan. Therefore, it is necessary for the device to be compatible with the charging method. This demonstrates that a reliable charger is of utmost importance for the longevity of the battery. However, even an efficient charger can be exposed to abnormal situations. Batteries are devices found everywhere today, such as in cell phones, cars, and laptops, where all these devices depend on a battery for their operation. Lead-acid and lithium batteries are the main types of batteries on the market, being applied in various areas. The chosen topology is based on the Buck DC-DC converter, where this type of application becomes interesting due to its characteristics of reducing the input voltage while continuously increasing its current, making it an interesting point for a low-power charger. Additionally, the presented topology has a reduced volume and weight and low cost due to not having many components in its structure. The design of the devices, as well as the current and voltage control loops, are presented in detail in this work. Experimentally, a lead-acid and lithium battery were used, and each of the charging stages was analyzed.

**Keywords:** Lithium batteries, *Buck* converter, charger..

## LISTA DE FIGURAS

1	Principais Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	19
2	Representação dos componentes de uma bateria.....	22
3	Processo de descarga de uma célula .....	23
4	Processo de carga de uma célula.....	23
5	Densidade de energia dos principais tipos de baterias.....	25
6	Princípio básico de um sistema de indicação de SoC baseado na medição direta .....	27
7	Diagrama colorido do Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS).....	32
8	Bateria de chumbo ácido e seus componentes.....	34
9	Curva de carga por célula de baterias chumbo ácido.....	37
10	Composição da bateria de lítio .....	39
11	Curva de carga por célula de baterias de lítio .....	42
12	Curva da capacidade da bateria e suas respectivas utilidades, conforme o tempo. ....	44
13	Classificação de diferentes métodos e níveis de carregadores de bateria para carros elétricos e híbridos.....	48
14	Carregadores <i>on-board</i> e <i>off-board</i> .....	49
15	Diagrama de blocos dos componentes do carregador de baterias .....	51
16	Estado da arte das topologias usadas para carregadores de baterias.....	52
17	Possíveis topologias de conversores CA-CC para carregadores de veículos elétricos.....	53
18	Possíveis topologias de conversores CA-CC para carregadores de veículos elétricos.....	54
19	Circuito de um Conversor Buck .....	57
20	Forma de onda de um Conversor <i>buck</i> .....	57
21	Etapas do modo de condução contínua.....	58
22	Forma de onda da corrente do indutor. ....	59
23	Formas de onda de corrente e ondulação de tensão no capacitor. ....	60
24	Etapas do modo de condução descontínua .....	62
25	Corrente no indutor para condição crítica .....	64
26	Etapas do modo de condução descontínua .....	65
27	Conversor <i>buck</i> .....	66
28	Formas de onda simplificadas de corrente e tensão .....	67
29	Modelo médio de grande sinais .....	68
30	Modelo CC linearizado.....	70
31	Circuito equivalente de pequenos sinais.....	71
32	Diagrama de blocos para controle da tensão de saída.....	72
33	Diagrama de blocos da corrente do indutor.....	73
34	Diagrama de blocos de controle de multimalhas para controle de $v_o$ .....	73
35	Fluxograma do Controle PI no Carregamento de Baterias.....	76
36	Circuito simulado no Simulink.....	79
37	Validação do modelo em malha aberta de corrente e tensão .....	80
38	Diagrama de bode $G_{id}$ .....	82
39	Diagrama de bode $G_{vd}$ .....	83
40	Margem de ganho e Fase de corrente em malha fechada .....	84
41	Resposta em Degrau em malha de controle de corrente.....	85

42	Margem de ganho e Fase de tensão em malha fechada .....	86
43	Reposta ao Degrau da malha fechada de tensão e saída .....	87
44	Carregamento da bateria iniciado com 20% de SoC .....	89
45	Carregamento da bateria iniciado com 50% de SoC .....	90
46	Carregamento da bateria iniciado com 99% de SoC .....	91
47	Temperatura do carregamento da bateria .....	92

## LISTA DE TABELAS

1	Principais características das baterias .....	24
2	Valores típicos para as baterias mais utilizadas .....	26
3	Comparativo de Densidade de Energia entre Subtipos de Baterias de Lítio ..	43
4	Especificações do Sistema .....	78

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>16</b>
1.1	Considerações Gerais.....	16
1.2	Justificativas .....	17
1.3	Objetivos e Contribuições.....	18
1.4	Estrutura do Trabalho .....	18
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>19</b>
2.1	Armazenamento de energia.....	19
2.1.1	Flyweels .....	19
2.1.2	Sistema de bombeamento de água .....	20
2.1.3	Capacitores eletroquímicos.....	20
2.1.4	Baterias eletroquímicas.....	21
2.2	Baterias .....	21
2.2.1	Características importantes das baterias .....	24
2.2.2	Densidade de energia .....	25
2.2.3	State of Charge (SoC) .....	26
2.2.3.1	Métodos de Medição .....	27
2.2.3.2	Aplicações .....	28
2.2.3.3	Método para Estimação de SoC Baseado em Integral da Corrente .....	28
2.2.4	State of Health (SoH).....	29
2.3	Seleção e aplicação de Baterias .....	29
2.3.1	Sistema de Gerenciamento de bateria .....	31
2.4	Tipos de baterias .....	32
2.4.1	<b>Bateria chumbo ácido</b> .....	33
2.4.2	Carregamento das baterias chumbo ácido.....	35
2.4.3	Bateria de Níquel-Cádmio .....	37
2.4.4	Bateria de Níquel-Metal Hidreto .....	38
2.4.5	Bateria de manganês de lítio.....	38
2.4.6	Bateria de Íon-Lítio.....	38
2.4.7	Funcionamento da bateria de íon-lítio .....	39
2.4.8	Tipos de baterias de lítio .....	40
2.4.9	Tipos de cargas na bateria de lítio.....	40
2.4.10	Comparativo de Densidade de Energia entre Subtipos de Baterias de Lítio .....	42
2.5	Baterias de segunda vida (SLB) .....	43
2.6	<b>Uma breve história dos veículos elétricos</b> .....	45
2.6.1	Tipos de veículos elétricos e suas características.....	45
2.6.2	Carregadores de baterias para veículos elétricos .....	46
2.6.2.1	Os níveis de potência do carregador.....	46
2.6.3	Carregadores <i>On-board</i> e <i>Off-board</i> .....	48
2.6.4	Carregadores unidirecionais e bidirecionais .....	49
2.6.5	Conversores empregados nos carregadores de bateria.....	49
2.7	Topologias de conversores utilizados em carregadores de bateria para veículos elétricos.....	50
2.7.1	Topologias monofásicas de conversores CA-CC .....	52
2.7.2	<i>Topologias monofásicas de conversores CC-CC</i> .....	53

2.7.3	Conversor <i>buck interleaved</i> .....	54
2.8	Considerações Finais .....	55
<b>3</b>	<b>Metodologia e implementação</b>	<b>56</b>
3.1	Introdução .....	56
3.2	Conversor Buck .....	56
3.2.1	Modo de condução contínua (MCC).....	58
3.2.2	Dimensionamento dos elementos passivos .....	59
3.2.2.1	Projeto do Indutor.....	59
3.2.2.2	Projeto do capacitor .....	60
3.2.3	Modo de condução descontínua (MCD).....	62
3.2.4	Cálculo do indutor.....	63
3.2.5	Cálculo do capacitor .....	64
3.3	Topologia e descrição do carregador proposto .....	65
3.4	Cálculo do <i>Ripple</i> e razão cíclica do projeto .....	66
3.5	Modelo Dinâmico do Conversor <i>Buck</i> .....	67
3.5.1	Modelo Médio de Grandes Sinais.....	67
3.5.2	Modelo Médio de Pequenos sinais (Linear) .....	68
3.5.3	Função de transferência para controle da tensão de saída .....	70
3.5.4	Função de transferência para o controle da corrente no indutor.....	71
3.6	Projeto do Compensador.....	73
3.7	Controle PI no Carregamento de Baterias .....	75
3.8	Considerações finais .....	76
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>78</b>
4.1	Introdução .....	78
4.1.1	Especificações do projeto.....	78
4.2	Validação do modelo do conversor Buck.....	80
4.2.1	Análise de desempenho e margens de estabilidade em malha fechada $G_{vd}$ e $G_{id}$ .....	81
4.3	Análise de Desempenho e Estabilidade de um sistema de controle no indutor em Malha Fechada .....	84
4.4	Análise de Desempenho e Estabilidade do sistema de controle de tensão em Malha Fechada.....	85
4.5	Carregamento da bateria com conversor <i>buck</i> .....	87
4.5.1	Processo de Carregamento com 20% de Estado de Carga (SoC) Inicial .....	88
4.5.2	Processo de Carregamento com 50% de Estado de Carga (SoC) Inicial .....	89
4.6	Processo de Carregamento com 80% de Estado de Carga (SoC) Inicial.....	91
4.7	Amostragem do comportamento da temperatura.....	92
4.8	Considerações Finais .....	93
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>94</b>
	<b>Referências</b>	<b>96</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais

Devido à sua alta densidade de energia, eficiência e vida útil prolongada, as baterias de íon-lítio são essenciais para a tecnologia moderna. Essas baterias têm mudado a forma como usamos e armazenamos energia. Estão em vários dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia em larga escala.

Uma das principais vantagens das baterias de íon-lítio é que podem armazenar mais energia em um espaço relativamente pequeno, tornando-as ideais para dispositivos compactos que exigem alta eficiência. Além disso, superam outras tecnologias de bateria, como as de chumbo-ácido e níquel-cádmio, em termos de eficiência energética, o que permite ciclos de carga e descarga rápidos (AHMED, 2009).

Mas as baterias de íon-lítio também têm muitos problemas. A preocupação constante é a segurança destas baterias, pois se não forem manejadas corretamente, elas podem sofrer falhas térmicas e incêndios. Os sistemas de gestão térmica e proteção são essenciais para reduzir esses riscos. O impacto sobre o meio ambiente e a sustentabilidade estão sendo um desafio adicional. Isso inclui a extração de lítio e outros materiais necessários, bem como a reciclagem e descarte das baterias após seu período de vida útil (BATTERY, 2021).

Como resultado, o desenvolvimento de um carregador de baterias bem projetado é essencial para garantir que a carga da bateria seja executada corretamente, respeitando temperatura, tensão e corrente. Um carregador bem projetado deve incluir circuitos de controle precisos que monitoram e ajustam constantemente esses valores para garantir que a bateria funcione de acordo com suas especificações de segurança e de desempenho. Além de aumentar a vida útil da bateria, isso protege a bateria de sobrecarga, superaquecimento e outros danos potenciais.

A crescente popularização e aumento de demanda em diversas aplicações em carregadores, tanto carregadores convencionais ou para áreas mais específicas, onde cada tipo de bateria necessita de uma carga específica (BATTERY, 2021). Nesse contexto, trabalhos são desenvolvidos com o objetivo de estudar e investigar as principais questões a respeito de melhores tipos de baterias, métodos de carga e de topologias conversoras. Os carregadores apresentam uma grande importância no funcionamento e na qualidade de carga elétrica fornecida para as baterias, um exemplo, que está em alta nos dias de hoje, é o

estudo baseado em carregadores para veículos elétricos, pois, são responsáveis por injetar energia elétrica derivada de uma fonte externa na bateria, sem prejudicar ou comprometer suas funções bem como o de todo o sistema elétrico. Portanto, esse dispositivo tem o compromisso de garantir uma tensão de saída com reduzida ondulação, conjunto com um controle de carga que preserve a vida útil da bateria. Além da qualidade de energia introduzida, os carregadores de bateria também devem assegurar a qualidade de energia drenada, principalmente quando esta energia é disponibilizada pela rede elétrica (LINDEN, 2002).

Se tratando das topologias de conversores estudados e desenvolvidos pela área da eletrônica e potência, podemos destacar o conversor *buck* que é um ótimo conversor quando falamos de praticidade, custo benefício, peso e poucos componentes. Muito conhecido pela sua característica de rebaixar a tensão de entrada quando se compara quando tensão entregue na saída, porém, um destaque sua injeção de tensão e corrente constante, o que ajuda na vida útil e na qualidade de carga (AHMED, 2009).

## 1.2 Justificativas

O bom funcionamento de um sistema de carregamento como um todo é indiscutível, no entanto, os seus componentes estão suscetíveis a falhas devido aos agentes externos ou pelo modo de fabricação. Neste contexto, é de grande importância que um carregador seja bem projetado, com uma escolha eficiente e própria para cada caso, diminuindo o máximo de consumidores e equipamentos afetados pelo problema, como exemplo, alta tensão, corrente e temperatura. Com isso, o carregador necessita de uma topologia de conversores adequada para um bom funcionamento, tendo como necessidade uma análise de qual função esse carregador apresentará, em qual tensão e potência esse dispositivo atuará.

Desta forma, é pertinente realizar um estudo abrangendo diversas topologias de conversores, tipos de baterias, métodos de carregamento e seu desempenho em diferentes situações, visando desenvolver um carregador multifuncional.

### 1.3 Objetivos e Contribuições

Este trabalho tem por objetivo geral buscar tipos de baterias, métodos de carregamento, topologias de conversores, estudo sobre carros elétricos e seus métodos de carregamento com a finalidade de projetar um carregador de bateria. Por objetivos específicos, tem-se:

- Realizar modelagens de banco de bateria.
- Estudo de sistemas de recargas de baterias.
- Análise e projeto do conversor *buck*.
- Análise de projeto de carga de controladores de baterias: Constante e de flutuação.
- Estudo de módulos de bateria.
- Implementação do conversor *buck* em um carregador.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica necessária para a realização deste trabalho, buscando conhecimento sobre baterias, carregamentos, veículos elétricos e topologias conversoras.

No capítulo 3, apresenta-se o estudo e a forma de operação das topologias apresentadas na literatura, conforme a escolha do projeto.

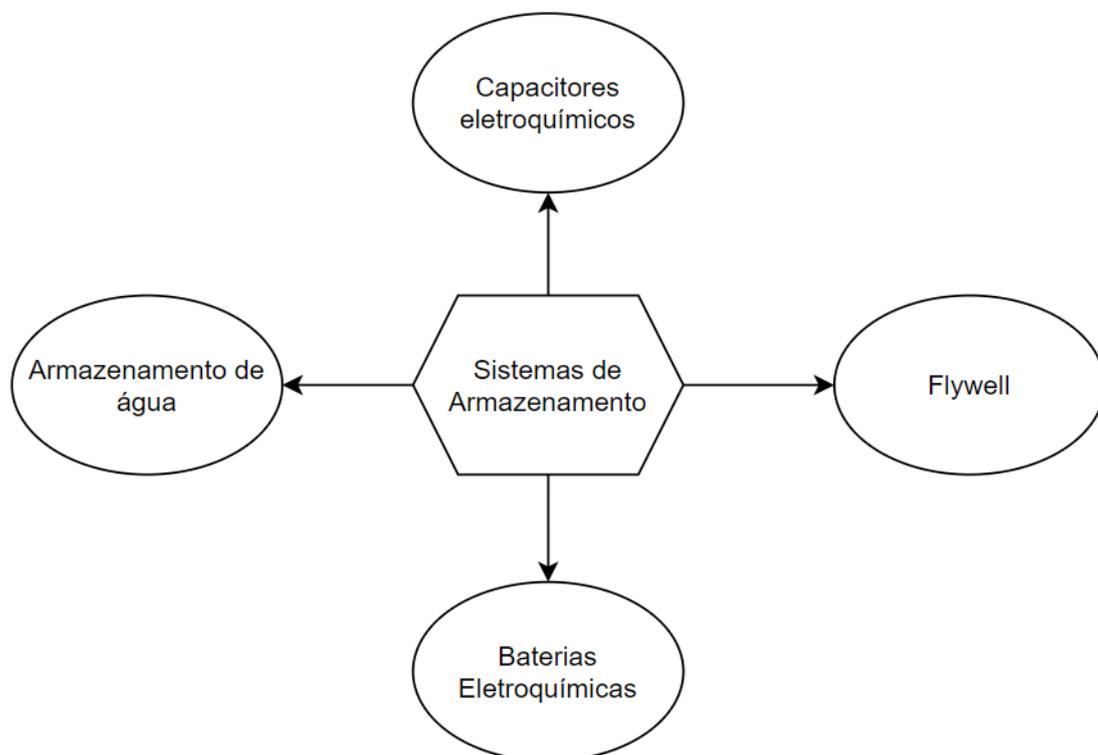
No capítulo 4, estará às simulações feitas através do MATLAB e *Simulink*.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Armazenamento de energia

Nos dias de hoje, o armazenamento de energia se estabelece como um fenômeno essencial para o funcionamento de inúmeras tecnologias presente do dia a dia. O armazenamento de energia elétrica é uma das tecnologias com grande importância e difundidas dentre as demais, podendo ser obtida de inúmeras formas. Na Figura 1 é apresentado alguns tipos de armazenamento.

Figura 1 – Principais Tecnologias de Armazenamento de Energia



Fonte: Próprio autor

#### 2.1.1 Flyweels

Os flyweels (volantes de inércia), são componentes mecânicos que acompanham vários equipamentos e máquinas, incluindo geradores, motores a combustão interna e sistemas de transmissão. O volante de inércia foi desenvolvido para armazenar e fornecer energia cinética de forma eficiente durante o funcionamento desses dispositivos.

Seus princípios são físicos, principalmente a conservação de energia. Os discos são robustos e normalmente feitos de aço ou ferro fundido, mas recentemente foram usados materiais como fibra de carbono ou resina de fibra de vidro, que são muito mais rápidos do que os discos de aço. Os volantes com essas inovações podem ter alta densidade de energia e potência, aumentar a eficiência e reduzir as perdas por atrito. Além disso, eles são longos e não custam muito para operar e manter (WORKS, 2023).

### **2.1.2 Sistema de bombeamento de água**

Os sistemas de bombeamento operam usando bombas de sucção que consomem energia elétrica para transferir água entre reservatórios em diferentes níveis de implantação. Como resultado, a energia é convertida em energia potencial, que pode ser utilizada para gerar hidroeletricidade posteriormente para atender às demandas em momentos específicos ou para controlar o preço de comercialização da energia.

Essa é a única tecnologia de armazenamento de energia em escala de gigawatts que foi desenvolvida em todo o mundo. Mais de 270 estações desse tipo estão em operação em todo o mundo e são capazes de gerar 120 GW de energia. (FILHO, 2017)

### **2.1.3 Capacitores eletroquímicos**

O termo "capacitor de dupla camada eletroquímica" descreve o princípio fundamental de armazenamento de carga desses capacitores, que são capazes de armazenar energia na interface eletrodo/eletrólito por meio de uma dupla camada elétrica. O termo "capacitores eletroquímicos" (CE) é mais adequado devido aos efeitos adicionais da dupla camada elétrica. Esses capacitores são usados em dispositivos de tecnologia pulsada para armazenamento de energia elétrica e em tecnologias de corrente senoidal; eles oferecem uma resistência a uma corrente alternada quase sem perdas de energia. São frequentemente usados em dispositivos de energia e informática portáteis.

Em baixas temperaturas, as baterias e as células a combustível não apresentam a mesma densidade de potência que os capacitores eletroquímicos. Isso permite que eles melhorem a densidade de potência das baterias. A energia diz respeito à capacidade acumulada de realizar trabalho, enquanto a potência diz respeito à rapidez com que a energia acumulada em um dispositivo é liberada. (OLIVEIRA, 2008)

### 2.1.4 Baterias eletroquímicas

Foi desenvolvida em torno de 1800, pelo físico Alessandro Volta, que desenvolvera a chamada pilha de volta. Com essa invenção foi possível gerar energia elétrica através de uma reação química. Em 1802 Johann Ritter desenvolveu a primeira bateria recarregável, porém, foi apenas "valorizada" 60 anos depois. Os anos se passaram e algumas tecnologias foram surgindo, com inúmeros materiais, resultando assim em dois tipos de classe, a bateria primária e a secundária (CUNHA, 2021).

É um sistema de armazenamento que converte energia química em energia elétrica por meio de reações eletroquímicas. Elas constituem em uma ou mais células, cada uma contendo dois eletrodos (um negativo e um positivo) imerso em um eletrólito.

Esse tipo de bateria tem diversas aplicações, principalmente em sistemas elétricos; esses incluem de chumbo-ácido, íon-lítio e níquel-cádmio, que serão discutidos mais adiante.

O termo "capacitor de dupla camada eletroquímica" descreve o princípio fundamental de armazenamento de carga desses capacitores, que são capazes de armazenar energia na interface eletrodo/eletrólito por meio de uma dupla camada elétrica. O termo "capacitores eletroquímicos" (CE) é mais adequado devido aos efeitos adicionais da dupla camada elétrica. Esses capacitores são usados em dispositivos de tecnologia pulsada para armazenamento de energia elétrica e em tecnologias de corrente senoidal; eles oferecem uma resistência a uma corrente alternada quase sem perdas de energia. São frequentemente usados em dispositivos de energia e informática portáteis.

## 2.2 Baterias

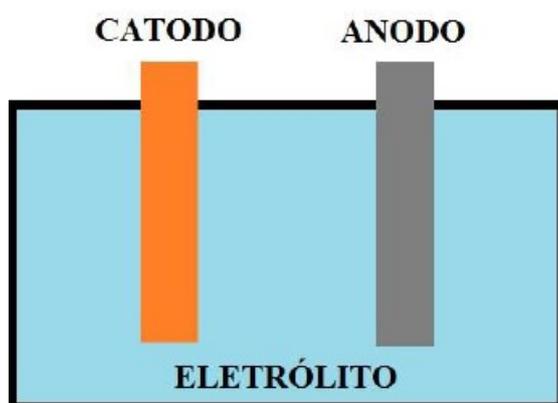
Uma bateria é um dispositivo que converte a sua energia química em energia elétrica, é feita através de uma reação eletroquímica de oxidação e redução. Com essa reação química, possui um deslocamento de elétrons dos materiais oxidados para materiais que reduzem através de um circuito elétrico. O sistema recarregável será feito pelo inverso desse processo. Na reação redox (oxidação-redução) não eletroquímica, como a ferrugem ou queima, o deslocamento desses elétrons ocorre apenas pelo calor que está envolvido (MICHELINI, 2017).

Apesar do termo "bateria" seja constantemente utilizado, a unidade elétrons básica é a "Célula". Uma bateria constitui-se em uma ou mais células, que são conectadas em

série ou paralelo, na qual também pode haver as duas conexões, dependendo da tensão e capacidade de saída desejadas. A célula possui três componentes fundamentais: anodo, catodo e eletrólito (MICHELINI, 2017). A Figura 2 representa uma amostra de um modelo básico de uma bateria.

- O anodo ou eletrodo negativo, é aquele que fornece elétrons ao circuito externo e, durante a reação eletroquímica, é oxidado;
- O eletrodo positivo ou catodo, é aquele que recebe elétrons do circuito externo e é reduzido durante a reação eletroquímica.

Figura 2 – Representação dos componentes de uma bateria



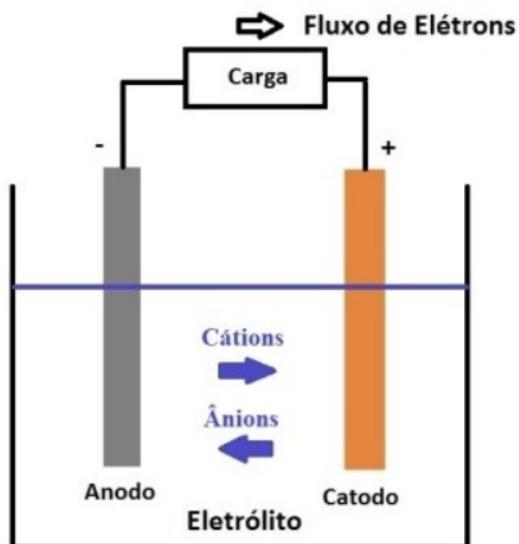
Fonte adaptada de (RONTEK, 2020)

Ao mesmo tempo, a função do eletrólito é transferir íons (carga) entre o anodo e o catodo dentro da célula. O eletrólito é geralmente um líquido, como água ou outro solvente, onde sais, ácidos ou bases são dissolvidos para aumentar a condutividade iônica (LINDEN, 2002).

Com isso, desde o surgimento desse termo, as baterias primárias são baterias descartáveis, ou seja, possui um ciclo de vida apenas (PILHAS). Já as baterias secundárias possuem um ciclo de vida maior, pois podem desempenhar vários ciclos de carga e após um certo número de ciclos essa bateria se torna inutilizável.

Quando uma carga é conectada ao anodo e ao catodo, ocorre o *processo de descarga da célula*, no qual os elétrons fluem do anodo (oxidado) para o catodo (reduzido) através da carga. O processo produz ânions e cátions. Na Figura 3 é apresentado o circuito elétrico completo que inclui o fluxo de íons entre os eletrodos através do eletrólito e o fluxo de elétrons através de um meio externo, que é representado pela carga que flui do anodo para o catodo.

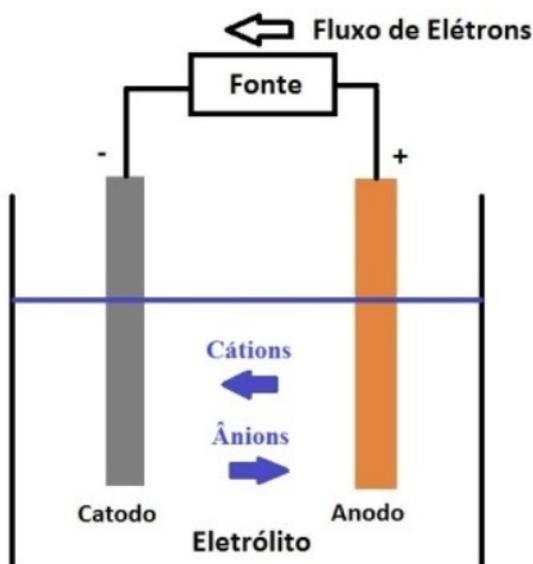
Figura 3 – Processo de descarga de uma célula



Fonte adaptada de (RONTEK, 2020)

A recarga é viável dependendo do tipo de célula. Esse processo inverte o fluxo de corrente: o eletrodo positivo se transforma em ânodo e o eletrodo negativo se transforma em cátodo. O circuito completo do processo de recarga de uma célula é mostrado na Figura 4. Nesse caso, uma fonte de alimentação externa é usada para carregar a bateria com uma tensão pré-estabelecida. (LINDEN, 2002)

Figura 4 – Processo de carga de uma célula



Fonte adaptada de (RONTEK, 2020)

Dependendo da tensão e/ou corrente necessárias, uma bateria é composta por uma ou várias células eletroquímicas conectadas eletricamente de maneira apropriada, seja em série ou em paralelo. Cada célula produz uma diferença de potencial pequena, que normalmente está entre 0,5 e 4 V. Como resultado, baterias com tensões mais altas têm mais células conectadas em série.

Nos veículos híbridos e elétricos, as baterias eletroquímicas são a melhor e mais confiável solução para o armazenamento de energia elétrica (NEOCHARGE, 22). Um dos principais motivos por ser a tecnologia mais utilizada atualmente é a sua elevada densidade de energia, também pelo seu baixo preço se compararmos com outras tecnologias disponíveis no mercado atual. Mesmo sendo a melhor opção quando falamos em questões econômicas, ainda assim o seu preço é muito elevado e o seu tamanho é consideravelmente grande, com isso a indústria automobilística possui um grande desafio para a difusão de veículos elétricos e híbridos pelo mundo.

### 2.2.1 Características importantes das baterias

Durante a construção de uma bateria, as mesmas características podem ser usadas para classificar vários materiais ativos. A Tabela 1 mostra que diferentes materiais têm densidades de energia diferentes.

Tabela 1 – Principais características das baterias

<b>Tipo de bateria</b>	<b>Tensão [V]</b>	<b>Variação de temperatura [°C]</b>	<b>Ciclos de carga</b>
Chumbo-ácido	2,1	35-70	600
Níquel-cádmio	1,25	30-50	2000
Níquel-metal hidreto	1,4	20-60	600
Níquel-zinco	1,6	40-65	250
Níquel-ferro	1,25	40-80	800
Sódio-enxofre	2,08	300-400	350
Zinco-ar	1,62	0-45	70
Lítio-ferro	1,66	400-450	500
Lítio-polímero	3,5	0-100	300

A tensão por célula, a temperatura de operação e o número de ciclos de carga (quantidade de vezes que a bateria pode ser carregada) são as principais características das

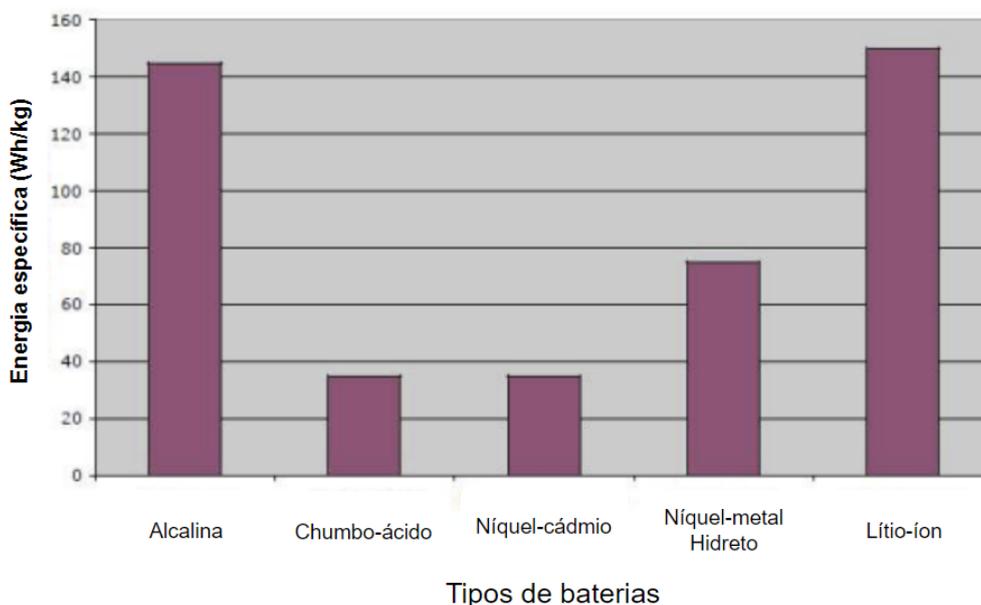
diferentes combinações de metais, mostradas na Tabela 1. As baterias Ni-Cd têm 2000 ciclos de carga útil, por exemplo. Mas as baterias de polímero de lítio (Li-Po) têm uma faixa de temperatura de operação de 0 a 100 °C. Isso é útil para aplicações como veículos elétricos (EVs).(LAFUENTE, 2011)

### 2.2.2 Densidade de energia

A densidade de energia das baterias é vital para muitas tecnologias modernas, desde eletrônicos portáteis até veículos elétricos. Smartphones, laptops e tablets precisam de baterias com alta densidade de energia para funcionar por longos períodos de tempo sem recargas frequentes. De forma semelhante, a duração dos veículos elétricos está diretamente relacionada à capacidade das baterias, que podem armazenar grandes quantidades de energia em um espaço compacto e leve.

A densidade de energia das baterias é vital para muitas tecnologias modernas, desde eletrônicos portáteis até veículos elétricos. Smartphones, laptops e tablets precisam de baterias com alta densidade de energia para funcionar por longos períodos de tempo sem recargas frequentes. Na Figura 5 está representada em forma de gráfico a densidade de energia das principais baterias do mercado.

Figura 5 – Densidade de energia dos principais tipos de baterias



Fonte adaptada de (RONTEK, 2020)

Na Tabela 2 está especificado valores típicos das baterias mais utilizadas no mercado atualmente.

Tabela 2 – Valores típicos para as baterias mais utilizadas

<b>Tipo de Bateria</b>	<b>NiCd</b>	<b>NiMh</b>	<b>Li-Ion</b>	<b>Chumbo</b>
Densidade de Energia (Wh/Kg)	60	80	160	40
Número de Ciclos – Médio	1500	500	700	300
Tempo para Carga Rápida (hrs)	1	3	3	12
Autodescarga Mensal (%)	20	30	10	5
Tensão da Célula (Volts)	1,25	1,25	3,6	2
Corrente de Carga Pico (C)	20	5	2	5
Corrente de Carga Padrão (C)	1	0,5	1	0,2
Temperatura Mínima (°C)	-40	-20	-20	-20 a -60
Temperatura Máxima (°C)	60	60	60	60

Fonte: (MICHELINI, 2017).

Em resumo, a densidade de energia das baterias é um componente crucial que determina a eficácia e a aplicabilidade de várias tecnologias atuais. A busca contínua por melhorias nesta área ajuda a atender às crescentes demandas por armazenamento de energia confiável e eficiente, promovendo a sustentabilidade e a inovação em vários setores da economia mundial.

### 2.2.3 State of Charge (SoC)

State of Charge é uma medida importante para sistemas de armazenamento de energia como baterias é o estado de carregamento, que é usado em uma variedade de dispositivos, incluindo eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas de energia renovável.

O percentual de capacidade total da bateria representa a capacidade do sistema. Com isso, a medição se baseia pela percentagem, por exemplo, 0% indica que a bateria está

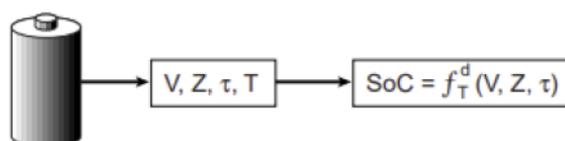
totalmente descarregada, enquanto 100% indica que o sistema está totalmente carregado. O sistema muda entre esses extremos conforme a bateria é usada e recarregada. (FINK; WIEDEMANN; SCHATZ, 2015)

O tempo estimado que uma bateria poderá oferecer carga a um dispositivo portátil sob as condições de descargas válidas antes de parar de funcionar, quando a tensão da bateria cair abaixo da tensão de fim de carga.

### 2.2.3.1 Métodos de Medição

- O método de medição direta se baseia em uma relação reproduzível e pronunciada entre a variável de medição da bateria (SoC). Essa variável da bateria deve ser eletricamente medível em um ambiente real. A tensão da bateria ( $V$ ), a impedância da bateria ( $Z$ ) e o tempo de relaxamento da tensão ( $\tau$ ) após a aplicação de um degrau de corrente são alguns exemplos de variáveis de bateria desse tipo. A temperatura ( $T$ ) determina a maioria das relações entre as variáveis da bateria. Portanto, deve-se medir a temperatura da bateria além da tensão e da impedância. A relação  $f_T^d$  entre a variável medida da bateria SoC, a temperatura ( $T$ ) é vista como um parâmetro, que pode ser armazenada no sistema. A Figura 6 mostra o princípio fundamental de um sistema de indicação baseado em medição direta. (FINK; WIEDEMANN; SCHATZ, 2015)

Figura 6 – Princípio básico de um sistema de indicação de SoC baseado na medição direta



Fonte adaptada de (FINK; WIEDEMANN; SCHATZ, 2015)

- Métodos baseados em tensão: Para determinar o SoC, medem a tensão da bateria e a comparam com uma tabela de valores conhecida. No entanto, este método pode ser impreciso devido às variações na tensão causadas por temperatura, idade e bateria. (KIEHNE, 2003)
- Métodos baseados em corrente: Para estimar o SoC, monitoram a corrente que entra e sai da bateria ao longo do tempo. Embora o método baseado em tensão possa ser mais preciso que o primeiro, ele requer hardware adicional, como sensores de

corrente.(KIEHNE, 2003)

- Metodologias baseadas em impedância: avaliam a resistência interna da bateria, que muda à medida que ela é carregada e descarregada. A estimativa do SoC pode ser feita com base nessa mudança na resistência. (KIEHNE, 2003)

### 2.2.3.2 Aplicações

A importância do SoC que é crucial para garantir o funcionamento adequado e da vida útil prolongadas das baterias. Com isso, é aplicado em diversos casos, por exemplo:

- Veículos Elétricos (VEs): O SoC do veículo mostra quanto poder resta nele e ajuda os motoristas a planejar em viagens e recargas.
- Eletrônicos Portáteis: indica a duração de uso do dispositivo antes de sua recarga.
- Sistemas de Armazenamento de Energia Renovável: Facilita a gestão da quantidade de energia disponível para uso em casas, negócios e redes elétricas.

Por fim, o SoC, é uma medida essencial para sistemas de armazenamento de energia, informa aos usuários sobre a quantidade de energia disponível e ajuda a garantir o melhor desempenho e vida útil das baterias. Para usar dispositivos e sistemas alimentados por bateria de maneira segura e eficaz, é necessário ter uma compreensão sólida do sistema em um chip (SoC).

### 2.2.3.3 Método para Estimação de SoC Baseado em Integral da Corrente

Para estimar diretamente o estado de carga (SoC) de uma bateria, muitas pessoas usam o método Coulomb Counting, que é baseado na integração da corrente. Este método fundamental, que consiste na integração da corrente ou suas variações, é usado por muitos sistemas de gerenciamento de baterias. Nesse método, a corrente de entrada e saída da bateria é calculada periodicamente, e o SoC é estimado subtraindo ou adicionando a carga líquida acumulada (ZHAO; CHEN, 2016).

O  $\eta$  representa a eficiência de Coulomb,  $I(t)$  é a corrente, que é positiva durante a descarga e negativa durante a carga, e  $SoC_{t_0}$  é o estado de carga inicial no tempo  $t_0$ . O método de integração da corrente permite estimar o SoC do sistema usando a corrente medida. Com a corrente medida, o SoC estimado pelo método de integral da corrente pode ser representado pela Equação (19):

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta I(t) dt \quad (1)$$

O filtro de Kalman estendido ou a abordagem de circuito aberto podem ser usados para estimar o SoC inicial,  $\text{SoC}_{t_0}$ . A capacidade nominal, ou CN, é medida em laboratório ou obtida do fabricante da bateria. A eficiência de Coulomb, que varia com a corrente e a temperatura, mostra a relação entre a carga total inserida e extraída na bateria durante um ciclo completo. É impossível substituí-lo por um valor médio. A eficiência do contador de Coulomb é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo temperatura, sistema on-board (SoC), estado de saúde (SoH), corrente de carga/descarga e características da bateria. A medida chamada SoH descreve a condição da bateria em comparação com uma nova (ZHAO; CHEN, 2016).

#### 2.2.4 State of Health (SoH)

SoH é um índice que mostra a capacidade da bateria atual em comparação com sua capacidade nominal. A maioria das vezes, é representado por uma porcentagem. Uma bateria com SoH de 80% pode armazenar apenas 80% da energia que podia inicialmente, enquanto uma bateria com SoH de 100% está em condições perfeitas, como quando era nova.

O cálculo do Estado de Saúde (SoH) de uma bateria pode ser feito de duas maneiras. Para realizar a estimativa, o primeiro método usa a medição da impedância. Por outro lado, o segundo método usa a capacidade para calcular a relação entre a capacidade atual e a capacidade nominal da bateria, pois a capacidade é um dos parâmetros que se degrada com o tempo. Essas técnicas ajudam a encontrar células defeituosas em bancos de baterias.

### 2.3 Seleção e aplicação de Baterias

Devido à ampla gama de aplicações dos sistemas de bateria, escolher a bateria certa é fundamental. A variedade de tipos de baterias e designs é necessária para atender aos requisitos elétricos e ambientais complexos. Cada uno desses deve funcionar de forma mais eficiente em ambientes operacionais específicos.

Apesar de muitos avanços tecnológicos aplicados em baterias nos últimos anos, tanto na melhoria do sistema eletroquímico e a implementação de novas químicas de bate-

rias, ainda não possui um tipo de "*bateria ideal*" que efetue de forma otimizada em todas condições operacionais. Resultando, no decorrer do tempo, muitos sistemas eletroquímicos diferentes e inúmeros tipos de baterias foram e estão sendo examinados e promovidos. Com isso, um pequeno número alcançou grande renome e volumes significativos para produção e vendas. Outras aplicações com baterias menos convencionais são utilizadas em aplicações industriais ou militares, que precisam de uma capacidade específica oferecida por estas tecnologias especiais de baterias. (LINDEN, 2002)

Com isso torna-se compreensível que a "célula ou bateria eletroquímica ideal" seja barata, tenha energia infinita, possa lidar com todos os níveis de potência, pode funcionar em todas as condições ambientais e temperaturas, com uma vida útil ilimitada e seja totalmente segura. Na prática, a energia é limitada porque os materiais são consumidos durante a descarga da bateria. A temperatura e a taxa de descarga são afetadas pelo desempenho e pela vida útil da bateria devido a mudanças físicas e reações químicas, que geralmente ocorrem lentamente. Para evitar danos físicos e elétricos, é necessário tomar precauções durante o uso de materiais componentes energéticos e designs especiais que requerem altas densidades de energia e potência e problemas que são relacionados à segurança. Sendo que, a influência das condições de descarga, carga e uso de bateria, devem ser considerados

Ao escolher uma bateria para uma aplicação específica, vários fatores devem ser levados em consideração. As características de cada bateria disponível devem ser consideradas em relação às necessidades do equipamento e a bateria mais adequada deve ser escolhida. A escolha da bateria deve ser levada em consideração no início do desenvolvimento do equipamento, ao invés de quando o hardware estiver finalizado. Assim, é possível combinar melhor as capacidades da bateria com o equipamento necessário.

Algumas considerações são importantes e influenciam na seleção da bateria e isso inclui:

- Tipo de Bateria: Primária, secundária ou sistema de reserva.
- Sistema Eletroquímico: Correspondência das vantagens e desvantagens e das características da bateria com os principais requisitos do equipamento.
- Tensão: Tensão nominal ou de operação, tensões máxima e mínima permitidas, regulação de tensão, perfil da curva de descarga, tempo de inicialização, atraso de tensão.
- Corrente e Perfil de Carga: Corrente constante, resistência constante ou potência constante; ou outros; valor da corrente de carga ou perfil, carga de valor único ou

variável, carga pulsada

- Ciclo de Trabalho: Contínuo ou intermitente, programação de ciclagem se intermitente.
- Requisitos de Temperatura: Faixa de temperatura sobre a qual a operação é necessária.
- Vida Útil: Tempo de operação necessário
- Requisitos Físicos: Tamanho, forma, peso e terminais.
- Ciclo de Carga-Descarga (se recarregável): Serviço de flutuação ou ciclagem; vida útil ou requisito de ciclo; disponibilidade e características da fonte de carga; eficiência de carga.
- Segurança e Confiabilidade.
- Custo: Custo inicial, custo operacional ou ciclo de vida, uso de materiais críticos ou exóticos (caros).

### **2.3.1 Sistema de Gerenciamento de bateria**

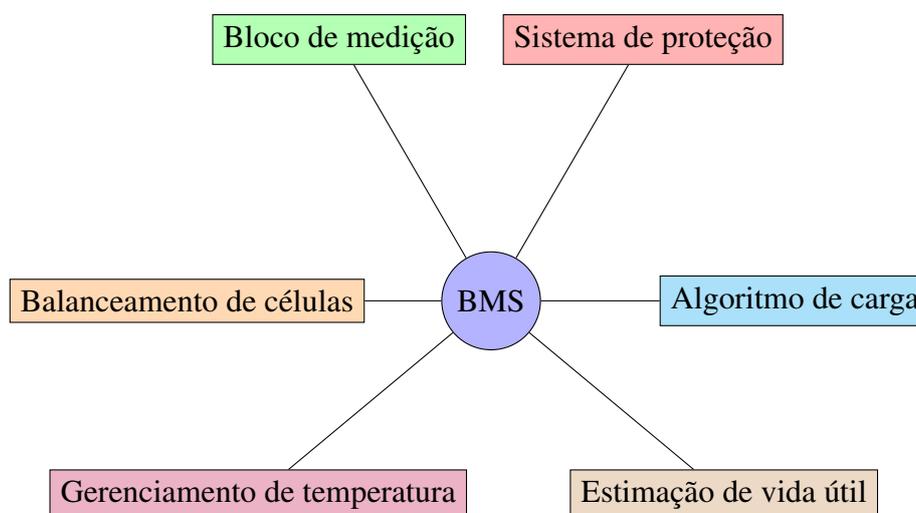
Um sistema eletrônico chamado Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) é responsável por administrar e monitorar o funcionamento de uma bateria. O BMS é fundamental para garantir que a bateria opere dentro dos limites de segurança, evitando situações que possam danificá-la ou colocar os usuários em risco.

Como é fundamental para operações seguras, desempenho eficiente e longevidade da bateria, o BMS é o núcleo de um pacote de baterias. Ele protege não apenas a bateria, mas também as pessoas que usam esses equipamentos, detectando operações inseguras e reagindo adequadamente para reduzir os riscos.

Além disso, a tecnologia avançada de um BMS permite que o software transmita dados e informações e monitore as condições da bateria em tempo real. Esse monitoramento contínuo garante que qualquer problema seja rapidamente encontrado e resolvido, melhorando o uso da bateria e prolongando sua vida útil.

O BMS pode realizar essas tarefas para garantir que as baterias funcionem de maneira mais eficaz e segura. Isso é importante para aplicações que vão de veículos elétricos a sistemas de armazenamento de energia e dispositivos portáteis. Abaixo, na Figura 7 representa em forma de diagrama um sistema de gerenciamento de baterias. (STA-ELETRONICA, 2024)

Figura 7 – Diagrama colorido do Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS).



Fonte: Próprio autor

As baterias eletroquímicas são amplamente utilizadas em uma variedade de setores, como consumidor, industrial e militar, e suas vendas globais superam \$50 bilhões por ano. Seu uso está crescendo rapidamente devido ao avanço da tecnologia da eletrônica, à demanda por dispositivos portáteis e à proliferação de novas aplicações, incluindo eletrônicos portáteis e veículos elétricos. (LINDEN, 2002)

## 2.4 Tipos de baterias

As baterias são divididas em categorias com base do tipo de uso (por exemplo, automotivas, estacionárias ou de tração) e no tipo de célula que as compõe (primárias e secundárias).

As baterias primárias geralmente são usadas em aplicações que usam pouca ou média quantidade de energia. Funcionam como uma fonte de energia embalada, conveniente e custo reduzido, que pode ser usada em uma variedade de dispositivos portáteis, incluindo iluminação, brinquedos, rádios e câmeras. Calculadoras, relógios e backups de memória também os usam muito. Devido à sua alta capacidade, densidade energética e longa vida útil, sem a necessidade de recarga ou manutenção, tamanhos maiores são feitos para usos especiais, como ajudar na navegação e reservar energia em locais remotos. (LINDEN, 2002)

As baterias secundárias, também conhecidas como baterias recarregáveis, são usadas como dispositivos de armazenamento de energia; eles geralmente são conectados

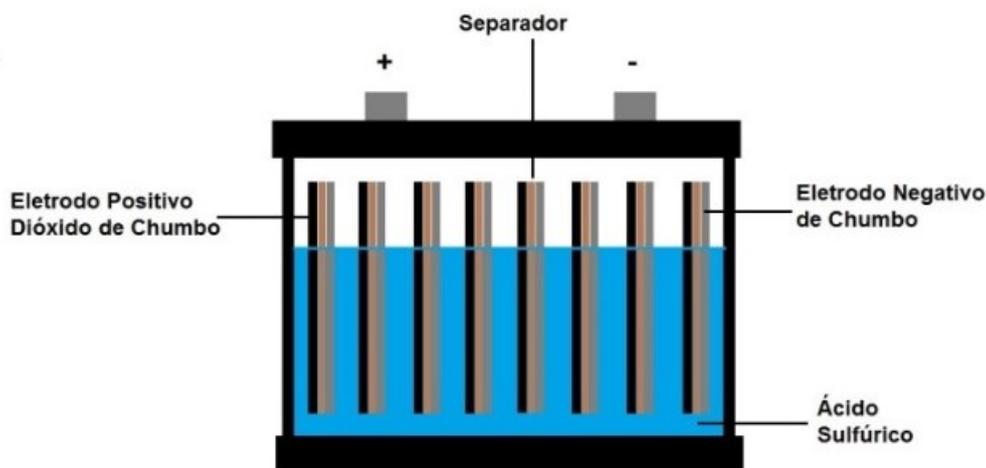
e carregados por uma fonte de energia primária, fornecendo energia à carga quando necessário. A bateria de partida, iluminação e ignição (SLI) de chumbo-ácido automotiva é um exemplo desse tipo de serviço, que é a principal aplicação da bateria secundária, bem como sistemas elétricos híbridos veiculares, que incluem sistemas elétricos de reserva, sistemas de energia ininterrupta (UPS) e nivelamento de carga. As baterias secundárias são usadas em aplicações em que são descarregadas e depois recarregadas a partir de uma fonte de energia diferente. Esse tipo de serviço inclui veículos elétricos e várias aplicações, principalmente dispositivos portáteis, como computadores, celulares e filmadoras. As baterias secundárias são preferidas às baterias primárias por vários motivos, incluindo a capacidade de recarregar ou a capacidade de suportar níveis de potência superiores aos de baterias primárias tradicionais.(LINDEN, 2002)

Na próxima seção, serão apresentados diversos tipos de baterias que correspondem ao que discutimos anteriormente nesta seção.

#### **2.4.1 Bateria chumbo ácido**

Em 1859 surge umas das principais baterias utilizadas pelo mercado, a bateria chumbo-ácido, inventada pelo físico Planté. Uma das suas maiores utilidades são no ramo automobilístico, aparelhos hospitalares e no-breaks. Muito comum devido ao seu baixo preço, com sua tecnologia avançada, torna-se a mais eficiente entre as baterias recarregáveis, possui uma baixa taxa de auto descarga e também possui uma ótima profundidade de descarga. Com o uso correto é durável e um fornecimento seguro. Os materiais inseridos nas células são: chumbo (Pb) e óxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>) que são os eletrodos e o eletrólito o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (FERREIRA, 2015). Na Figura 8 apresenta-se a bateria chumbo ácido e seus componentes.

Figura 8 – Bateria de chumbo ácido e seus componentes



Fonte adaptada de (OLIVEIRA, 2014)

Existem basicamente três tipos de baterias que necessitam de uma grande intensidade de corrente: baterias tracionárias, automotivas e estacionárias:

As baterias tracionárias, que possuem um ciclo profundo, foram preparadas para perdas de até 80 por cento de sua capacidade de carga, podendo ser realizadas inúmeras vezes ou até 1000 vezes durante sua vida útil. Por dentro possuem espessas placas (4,2mm). São baterias de grande volume e tensões elevadas de no mínimo 48v. Sua utilidade é para veículos com grande tração, empilhadeiras, máquinas agrícolas e caminhões (LAZZARIN, 2006).

A bateria automotiva é a mais comum entre elas, utilizada no ramo automobilístico, tem sua principal função a partidas dos veículos. Neste caso há uma necessidade de uma elevada corrente por um curto intervalo. Ao contrário das baterias tracionárias, suas placas possuem a espessura de 1 mm apenas, são preparadas para não descarregarem mais que 5 por cento capacidade total (LAZZARIN, 2006).

Baterias do tipo estacionárias é o meio-termo entre as duas baterias citadas. Suas placas são mais espessas que as baterias automotivas e mais finas que as baterias tracionárias, são utilizadas em UPS. A bateria estacionaria é designada para trabalhos em locais fixos e sem a movimentação do eletrólito. Ideais para a aplicação em veículos elétricos, por suas características de fornecer uma corrente constante por um longo período de tempo e descarregar completamente inúmeras vezes (LAZZARIN, 2006).

## 2.4.2 Carregamento das baterias chumbo ácido

Por mais que uma bateria seja bem projetada, ela estará exposta a ação de fenômenos que podem alterar o seu funcionamento. Um processo de carga inadequado em uma bateria pode ocasionar uma carga insuficiente, diminuindo gradativamente a sua capacidade de armazenamento, outro problema é o carregamento com níveis inadequados de tensão, variações na temperatura de operação, descargas profundas e problemas de sulfatação podem reduzir mais de 50% a sua vida útil (LAZZARIN, 2006).

Em geral, as baterias seladas de chumbo-ácido o tempo para se obter uma carga completa é de 12-16 horas, às estacionárias são mais demoradas, o tempo necessário é de 36-48 horas. Há soluções que podem reduzir esse tempo, uma delas é elevando a tensão. Por fim, possuem inúmeras técnicas que irão variar de acordo com a demanda de carga (MICHELINI, 2017).

Portanto, existem diversos tipos de carregamentos que visam ampliar a vida útil das baterias. Os métodos de carga diversos de acordo com a característica de corrente e tensão LAZZARIN (2006). Existem três métodos estabelecidos de carga, que tem como característica a aplicação de corrente constante, tensão constante e potência constante (BERNDT, 2009).

Carregamento de corrente constante: Usado em pequenas baterias de chumbo-ácido. A utilização em grandes baterias de chumbo-ácido não é amplamente usada, isto ocorre pela necessidade de ajustar a corrente, a menos que a corrente da carga for mantida em um nível baixo durante toda a carga. Com esse nível baixo de corrente uma carga pode demorar mais de 12 horas (BERNDT, 2009).

Carregamento de pulso: Muito utilizado em aplicações de tração BERNDT (2009). Neste tipo de carregamento é inicialmente colocada uma corrente constante, depois de um tempo a corrente será zero. Depois de um curto tempo a bateria é carregada outra vez. No período do repouso as reações químicas na bateria se estabelecem e a equalização da reação da carga por todo o eletrodo (FERREIRA, 2015).

Carregamento lento: Esse método consiste em projetar uma carga lenta e de corrente constante. Feito para manter as baterias em condições de carga total, prevenindo assim a vida útil das perdas de autodescargas. Esse método é muito utilizadas em SLI (starting, lighting, and ignition) que é muito comum em automóveis. Também auxilia na redução da formação de gás. Este método necessita de muito tempo para se obter a carga completa, no entanto, sua vida útil pode ser aumentado a partir desse método de carga

(BERNDT, 2009).

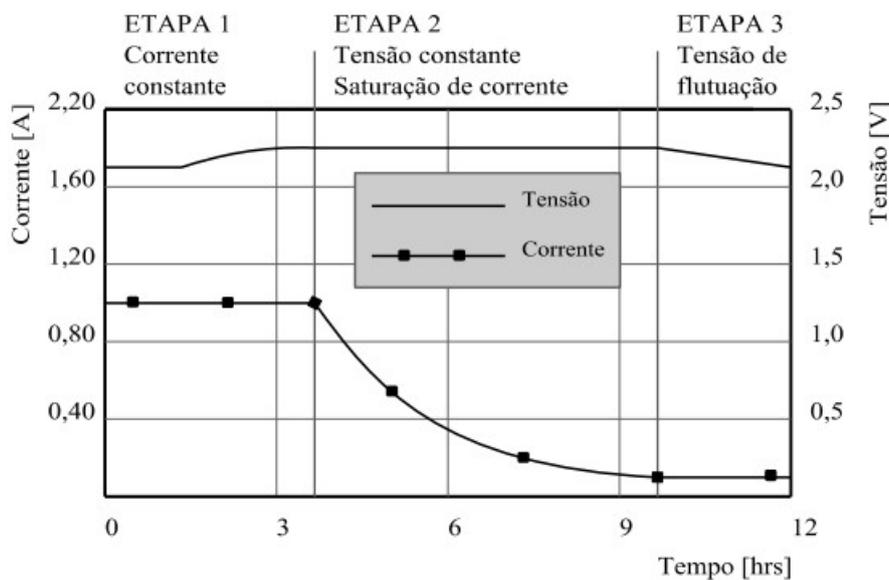
Carregamento rápido: Possui uma corrente constante acima do limite atual da temperatura, sempre considerando o manual do fabricante. Sua carga máxima é de 80 por cento apenas, quando a tensão de carga chega no ponto de gaseificação, o carregamento deve ser parado. Seguindo essas orientações a vida útil da bateria é de mais ou menos 2,5 anos. Sua aplicação é usual quando não há tempo para a carga da bateria (FERRO, 2018a).

Uma das técnicas mais recomendadas, concede uma vida útil maior para a bateria, consiste em três estágios. No primeiro, é aplicada uma corrente constante por um período de cinco horas, e a tensão da célula sendo elevada até alcançar a tensão nominal. Nesta etapa, a bateria chega aos seus 70% de sua capacidade (LAFUENTE, 2011).

Na segunda etapa, a corrente começa a diminuir gradativamente até que atinja o ponto de saturação da célula, neste caso a célula não possui mais capacidade de reter carga, com isso, não haverá circulação de corrente através da célula. A tensão aplicada nesta etapa é constante levando cerca de cinco horas. Na etapa dois, é considerada primordial, pois, é onde se prolonga o tempo de vida útil da bateria, caso esta etapa seja interrompida, a bateria tem grandes chances de obter perdas em sua capacidade de carga máxima (LAFUENTE, 2011).

Por fim, na terceira etapa, também conhecida como etapa de flutuação, consiste em uma aplicação de uma corrente mínima e de uma tensão ondulatória. Significando que a tensão da bateria deve possuir pequenas variações acima do valor nominal para a compensação do efeito de descarga natural da bateria. O maior objetivo desta etapa é manter uma tensão nominal de saída quando a bateria não for utilizada (LAFUENTE, 2011). A Figura 9 apresenta as três etapas.

Figura 9 – Curva de carga por célula de baterias chumbo ácido.



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

### 2.4.3 Bateria de Níquel-Cádmio

Consiste basicamente em um anodo, cujo seu material ativo é o hidróxido de Níquel  $\text{Ni(OH)}_2$  e um catodo, cujo seu elemento seja o Cádmio (Cd). Neste tipo de bateria, os eletrodos estão submersos no eletrólito, que é constituído de uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH). Com isso os íons estão livres para a circulação à medida que as reações de carga e descarga acontecem (CUNHA, 2021).

Comparada as baterias de chumbo-ácido possuem uma tecnologia mais recente. Diante disso, existem propriedades vantajosas em comparação com a bateria de chumbo-ácido, maior ciclo de vida, podendo realizar mais de 1000 ciclos de carga e descarga, possui também maior densidade energética e uma boa adaptação para temperaturas mais baixas. Porém, esse tipo de bateria possui as suas desvantagens, o Efeito Memória, é onde acontece a perda na capacidade de retenção de carga após diversas cargas e descargas indevidas, também possui uma grande toxicidade em relação ao meio ambiente e elevadas taxas de auto descargas (CUNHA, 2021).

#### **2.4.4 Bateria de Níquel-Metal Hidreto**

É uma classe de baterias recarregáveis conhecida como baterias de níquel-metal hidreto (Ni-MH) funciona por meio de reações eletroquímicas entre o óxido de níquel hidratado ( $\text{Ni(OH)}_2$ ) no eletrodo positivo, uma liga de metal hidreto no eletrodo negativo e uma solução eletrolítica alcalina. (SILVA, 2021)

São utilizadas geralmente para tracionar veículos híbridos, contudo, raramente são utilizadas na tração de veículos elétricos. Isso ocorre devido às variações no fluxo de energia dos veículos elétricos e híbridos. Nestes veículos a energia elétrica é utilizada em momentos diferentes e com objetivos diferentes. Devido à sua densidade de energia 50% maior do que as baterias de chumbo ácido, as baterias de níquel-metal hidreto são as baterias mais eficazes do mercado. Elas têm a capacidade de carregar e descarregar dados a taxas elevadas em curtos períodos de tempo. No entanto, se a bateria for descarregada repetidamente em alta corrente, seu ciclo de vida será reduzido em cerca de 200 a 300 ciclos.(SILVA, 2021)

#### **2.4.5 Bateria de manganês de lítio**

A bateria de manganês de lítio foi pioneira em sistemas de lítio a ser usado comercialmente, hoje em dia é a bateria de lítio mais utilizada não recarregável do mercado. O formato mais conhecido deste tipo de bateria é o modelo moeda. Possui uma tensão nominal de 3V por célula. Possui uma vida útil longa, baixo custo e pode ser utilizada em diversas aplicações com variações de temperatura, tendem a suportar entre  $-20^\circ\text{C}$  a  $65^\circ\text{C}$ . Vem sendo muito estudada, especialmente para aplicações em veículos elétricos (LAFUENTE, 2011).

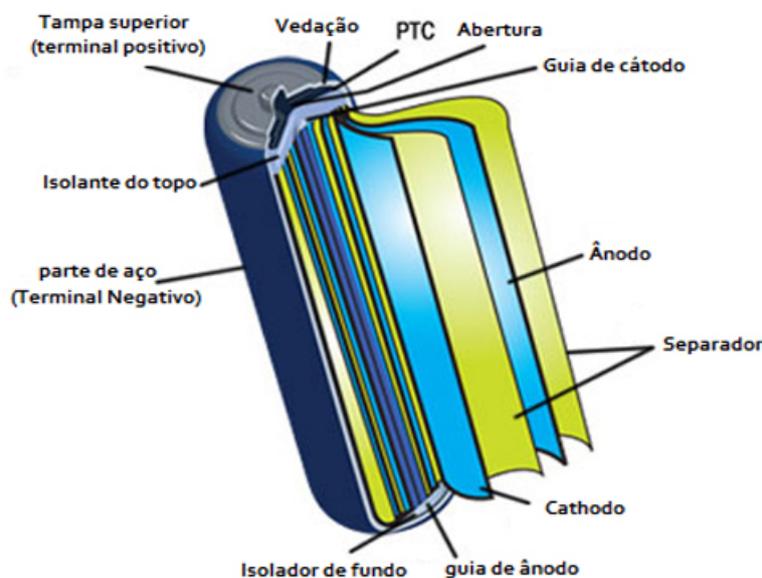
#### **2.4.6 Bateria de Íon-Lítio**

É uma tecnologia descoberta feita há pouco tempo, com uma química promissora entre outros tipos de baterias. É o metal mais leve e o elemento mais eletronegativo entre os outros metais, o lítio é o material de eletrodo negativo mais atraente para baterias de alta energia (FERRO, 2018a). É muito comum utiliza-la quando tem a necessidade de uma alta densidade de energia e peso leve. Os materiais de eletrodo eletroquimicamente presentes

na bateria de íons de lítio são um óxido de cobalto, para o eletrodo negativo e carbono para o eletrodo positivo. Também é constituído de um separador que tem a função de separar o óxido de cobalto do lítio. É composto por uma matéria semipermeável, passando unicamente um tipo de material, no caso, os íons de lítio (LINDEN, 2002).

Possui uma baixa manutenção, uma boa vantagem que a maioria das outras baterias não tem. Esse tipo de bateria não possui nenhum ciclo programado e isso é uma boa característica para o prolongamento da vida útil do dispositivo e sua auto descarga é bem pequena comparada com outras baterias (MICHELINI, 2017). Na Figura 10 é mostra-se a composição da bateria lítio.

Figura 10 – Composição da bateira de lítio



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

#### 2.4.7 Funcionamento da bateria de íon-lítio

Quando acionada, os íons de lítio se movimentam do ânodo para o cátodo para o eletrólito, com isso, irá surgir uma diferença de potencial que produz uma corrente elétrica, isso ocorre quando a bateria está sendo descarregada (IBERDROLA, 2022).

Ademais, as baterias de lítio agregam outros elementos que causam uma melhoria no seu desempenho e segurança: O sensor de temperatura caso a bateria estiver acima do permitido pelo fabricante, circuito regulador de tensão e um monitor do estado de carga. Estes dispositivos atuam no controle da carga e o fluxo de corrente, mostram a quantidade

alcançada na última carga completa (IBERDROLA, 2022)

#### **2.4.8 Tipos de baterias de lítio**

Os formatos mais encontrados de baterias de lítio são: Cilíndricos, prismáticos e bolsa ou pouch:

Células de íons de lítio cilíndricas: Tem uma grande similaridade com o formato de pilhas convencionais, porém sua capacidade de carga e tamanho são maiores. Possuem muitos modelos o 14500, 26650 e 18650 ASSIS (2021). A Tesla grande inovadora no ramo automobilístico de carros elétricos, desenvolveu recentemente um novo modelo, 21700, possuindo uma capacidade bem maior que os outros modelos. São comuns em notebooks, câmeras digitais e filmadoras (TOLL, 2017).

Células de íons de lítio Prismáticas: São muito semelhantes as baterias tipo "bolsa". Por conta do seu formato retangular se perde um pouco de eficiência por conta do espaço utilizado, porém, são mais duráveis do que as baterias de "bolsa" Toll (2017). Por conta dos seus terminais mais robustos (rosqueáveis), permitem uma conexão mais eficaz na junção de mais células prismáticas em módulo de baterias maiores. Grandes células prismáticas de 20Ah a 100Ah são utilizadas constantemente usadas em carros elétricos ou como baterias domésticas, por conta do seu grande armazenamento de energia (ASSIS, 2021).

Células tipo pouch ou bolsa: É a formatação mais simples de todas as células de bateria de lítio. Consiste em saco de papel alumínio, com dois terminais finos, que são dobrados para frente e para trás várias vezes dentro da bolsa para aumentar a sua capacidade de armazenamento. Por dentro, ela é semelhante a todos os outros tipos de célula de lítio, tendo anodo e catodo em lados opostos com o separador no meio e os eletrólitos nas pontas. São leves, baratas de produzir e não possui nenhum tamanho padrão. A principal desvantagem é não possuir uma proteção externa, com isso, podem ser danificadas, quando velhas estufam por conta dos pequenos curtos internos, criando gases (TOLL, 2017).

#### **2.4.9 Tipos de cargas na bateria de lítio**

O carregamento desse tipo de bateria é muito simples. No entanto, o carregamento necessita de um cuidado maior, pois, pode se tornar muito perigoso. Existem casos de incêndios causados por esse tipo de bateria, que geralmente são quando estão na fase

de carregamento. O tipo de carregador usado dependerá se a bateria possui BMS ou não. Todavia, o mecanismo de carregamento das células de lítio é sempre o mesmo, que independe da sua construção (ASSIS, 2021).

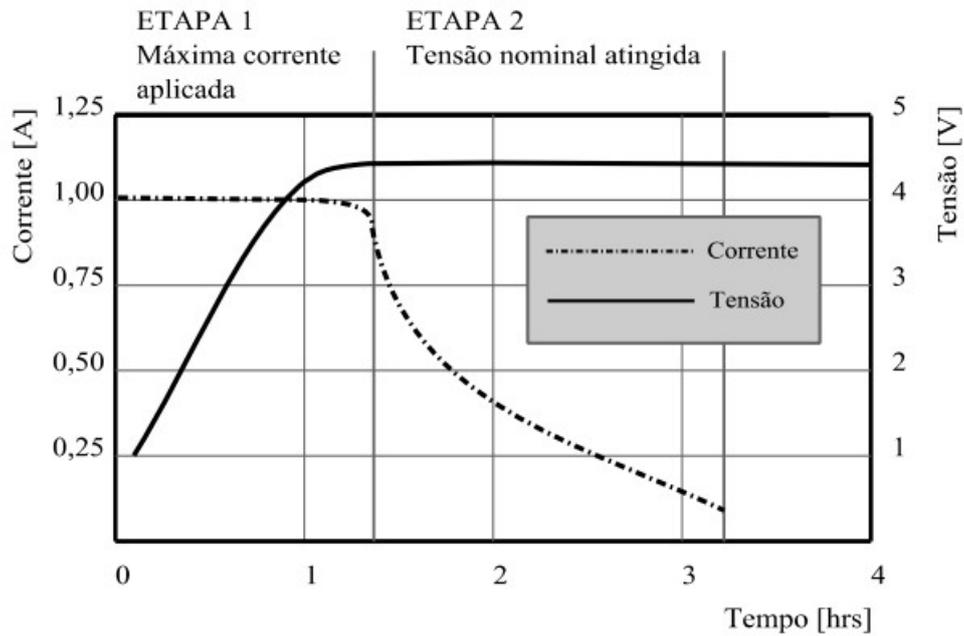
O carregamento de corrente constante e tensão constante são conhecidos pelo sistema de carregamento (CC-CV), ou seja, o primeiro período do carregamento é por um estágio de corrente constante, enquanto a segunda ocorre com um estágio de tensão constante. No primeiro estágio a tensão irá subir até um determinado limite definido no carregador, essa tensão fica em trono de 4,2V, após isso a tensão será constante e a corrente torna-se variável, diminuindo gradativamente. O carregador zera a corrente quando atingir um valor próximo de zero, geralmente entre 100 mA a 200 mA, Nesse ponto ela está totalmente carregada (TOLL, 2017).

Carregamento com BMS (Battery Management System) tem a função de monitoramento da condição da bateria e possui o controle da corrente de entrada e saída entre ele e o carregador (EQUIPAMENTOS, 2018). Possui o método de carregamento em massa, que basicamente todas as baterias são carregadas como uma unidade, uma corrente flui por meio do grupos paralelos de células conectadas em série, recebendo a mesma quantidade de corrente. Quando a carga nas células chega próxima da carga total, o BMS de forma inteligente irá drenar a energia dos grupos paralelos que atingiram o carregamento total primeiro, o dispositivo para quando todas as células estiverem com carga total (TOLL, 2017).

Carregamento sem BMS, também possui o método de carregamento em massa, porém, sem o BMS essa carga ficará desequilibrada e algumas células vão ficar sem a carga total.

As baterias de Lítio não possuem carregadores rápidos, pois sua estrutura química deste tipo de bateria não permite. Seus fabricantes são severos em suas recomendações como é mostrado na Figura 11, onde, em sua primeira etapa, aplica-se uma corrente constante de 1 A para incrementar progressivamente a tensão até 4,2 V por célula. Na última etapa, aplica-se uma tensão constante e reduz a corrente gradativamente até atingir o valor de 3% da corrente nominal da célula. Com isso a bateria atinge a carga total em um período de três horas. As baterias de Lítio não precisam de escorvamento, que significa que o carregamento inicial não necessita de uma período prolongado.

Figura 11 – Curva de carga por célula de baterias de lítio



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

#### 2.4.10 Comparativo de Densidade de Energia entre Subtipos de Baterias de Lítio

As baterias de lítio são essenciais para uma variedade de aplicações tecnológicas modernas, incluindo dispositivos eletrônicos portáteis e veículos elétricos. Sua alta densidade de energia permite maior autonomia e eficiência em um formato leve e compacto, o que os torna populares. Mas existem vários subtipos de baterias de lítio dentro da categoria, cada um com características que o tornam melhor para usos específicos.

Subtipo de Bateria	Densidade Volumétrica (Wh/L)	Densidade Gravimétrica (Wh/kg)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Íon-Lítio (Li-Ion)	200-300	150-250	Alta densidade de energia, longa vida útil	Risco de superaquecimento	Eletrônicos, veículos elétricos
Polímero de Lítio (Li-Po)	250-350	200-300	Leve, flexível	Custo mais alto	Drones, smartphones
Fosfato de Ferro-Lítio (LiFePO4)	220-280	90-160	Alta segurança, vida útil longa	Densidade de energia mais baixa	Veículos elétricos, armazenamento
Óxido de Manganês-Lítio (LiMn2O4)	320-350	100-150	Boa estabilidade térmica	Vida útil mais curta	Ferramentas elétricas
Óxido de Cobalto-Lítio (LiCoO2)	400-500	150-200	Alta densidade de energia	Custo elevado, segurança menor	Laptops, smartphones
Titânio-Lítio (Li4Ti5O12)	180-240	50-80	Ciclo de vida extremamente longo, alta segurança	Densidade de energia baixa	Sistemas de backup, veículos elétricos

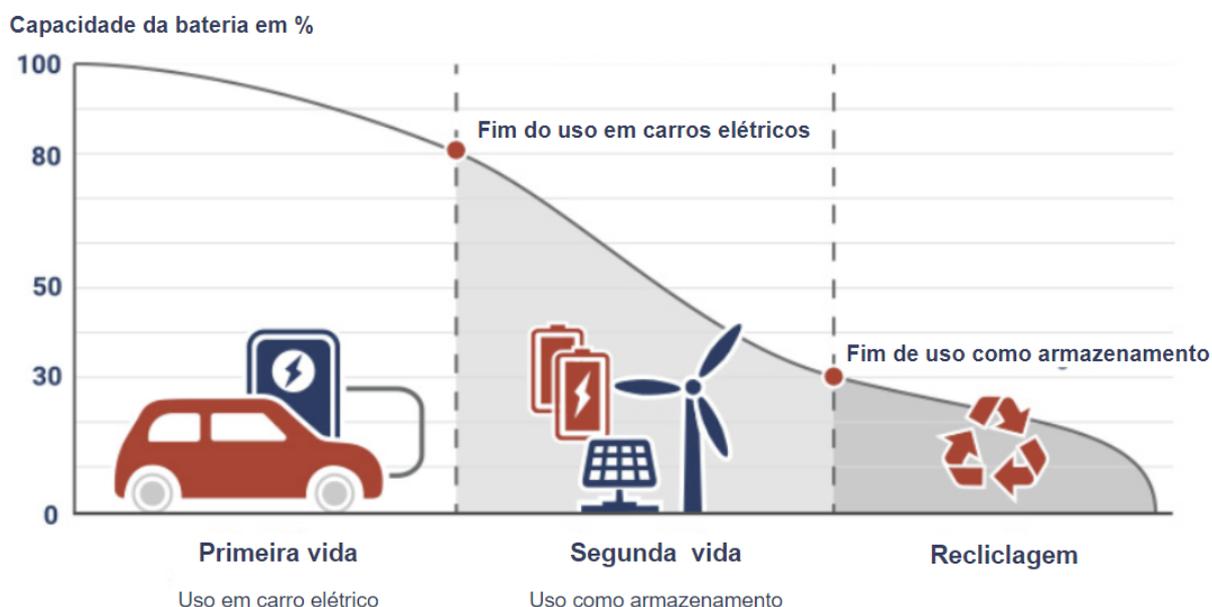
Tabela 3 – Comparativo de Densidade de Energia entre Subtipos de Baterias de Lítio

Para escolher a tecnologia certa para várias aplicações, você deve saber como cada tipo de bateria de lítio difere. A pesquisa e o desenvolvimento contínuos em novos materiais e tecnologias de baterias aumentam ainda mais a densidade de energia, a segurança e os custos, impulsionando grandes avanços em dispositivos eletrônicos, transporte e armazenamento de energia.

## 2.5 Baterias de segunda vida (SLB)

Devido ao grande crescimento do mercado de veículos elétricos, o termo SLB (Second life battery) foi criado. Surge como uma alternativa para a diminuição do alto valor econômico e ambiental realizado por empresas automobilísticas, que necessitam realizar o descarte desses dispositivos, esse tipo de bateria chega a custar a metade do preço de baterias novas.

Figura 12 – Curva da capacidade da bateria e suas respectivas utilidades, conforme o tempo.



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

Por mais que sejam baterias de segunda vida elas possuem uma alta densidade energética de 70 a 80 por cento. São descartadas quando chegam ao fim da sua primeira vida útil. Permitindo a implementação de novas aplicações de menor estresse energético Enelx (2022). Também torna os veículos elétricos mais baratos, porque converte os custos de eliminação de resíduos em valor residual. Com a menor demanda de novas baterias reduz a necessidade de matérias-primas, que alivia o processo de extração de materiais necessários para a fabricação das baterias (BEKAERT, 2022).

O processo de reutilização de baterias começa quando sua primeira vida útil acaba. Necessita de diferentes estágios e processos para que essa bateria possa ser utilizada (BEKAERT, 2022). O reaproveitamento dessas baterias consiste em a junção de várias células (do mesmo tamanho) com boa capacidade. são combinadas e embaladas como uma só. Recondicionar também é uma alternativa, as baterias são desmontadas, retiram as células, recondicionam e são montadas novamente em novos módulos (ENELX, 2022). E por fim a reciclagem que inclui extrair os componentes e metais da bateria, nesse caso, a bateria já está com menos de 30 por cento de eficiência (KG, 2022).

Uma vez definidos os padrões amplamente aceitos e um regime regulatório que estabelece diretrizes amplas, a ampla adoção de baterias recicladas oferece um futuro promissor depegada de carbono reduzida e aumento da atividade econômica local, todos

contribuindo positivamente para a economia circular. (CANTU ALINE KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA, 2022)

Por fim, existem muitas aplicações que esse tipo de bateria pode ser utilizado. Podem ser utilizadas em edifícios, que irão alimentar durante as horas de pico desse prédio e reduzir a emissão de carbono Cantú Aline Kirsten Vidal de Oliveira (2022). Outra aplicação é como baterias estacionárias, muito utilizado para armazenar energia de usinas solares, eólicas ou até mesmo de termoelétricas (CANTU ALINE KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA, 2022).

## **2.6 Uma breve história dos veículos elétricos**

Os veículos elétricos aparecem como uma opção aos automóveis convencionais com a ideia de "Zero Emission "(Zero emissões). Com o tempo, esse termo começou a ganhar mais força, atualmente a atmosfera vem sofrendo um grande impacto por conta de gases causadores de efeito estufa e os veículos a combustão são um dos principais causadores deste efeito, com isso, os veículos elétrico que produzem "emissões nulas"vem se tornando uma alternativa. A utilização de veículos elétricos também está ligada a energias limpas, derivadas, por exemplo, a parques de energia eólica e estações de energia fotovoltaica.

Todavia, os veículos elétricos são uma invenção relativamente antiga, que está relacionada a criação e ao desenvolvimento dos primeiros protótipos de baterias em meados dos século XVIII. Um dos principais modelos da época foi um exemplar com uma autonomia de 1609 km possuindo um banco de bateria não recarregáveis. A partir deste veículo, diversos automóveis elétricos vem sendo desenvolvido com tecnologias mais recentes (LAFUENTE, 2011).

### **2.6.1 Tipos de veículos elétricos e suas características**

Podem ser divididos em três tipos: os veículos elétricos híbridos, veículos elétricos plug-in e os veículos elétricos a bateria. Os veículos inteiramente híbridos, utilizam um grupo de geradores associado ao motor de combustão para gerar e armazenar energia elétrica. Já os veículos elétricos plug-in e a bateria possuem esse nome pela capacidade de conectar-se à rede elétrica para realizar a recarga da bateria. Os três veículos possuem a

tecnologia de frenagem regenerativa, ou seja, convertem a energia cinética liberada pela frenagem para energia elétrica, dando mais autonomia à bateria. Um motor elétrico possui uma grande eficiência estimada em torno de 90%, quando comparamos com os motores a combustão possui uma enorme queda na eficiência que fica estimada em 15% a 30%. Outras vantagens de um motor elétrico o baixo ruído, a tecnologia de desligamento do motor quando estiver parado, economizando energia e, no caso dos veículos híbridos, o combustível (CAETANO, 2021).

A principal dificuldade encontrada pelas empresas automobilísticas de veículos elétricos é sua baixa autonomia quando comparado ao motor a combustão. O alto custo e baixa capacidade energética das baterias não permitem que os veículos se desloquem para distâncias maiores. O avanço de novas tecnologias no ramo das baterias e na construção de estações de recarga em grandes polos e nas estradas tem ajudado a minimizar este problema (CAETANO, 2021).

## **2.6.2 Carregadores de baterias para veículos elétricos**

Responsáveis pelo carregamento das baterias, os mesmos, tem o dever de possuir diversas características em diversas aplicações. O carregamento de veículos elétricos exige um carregador diversificado, que deve atender as exigências de cada norma, que são referentes ao sistema de carregamento de veículos elétricos. Para estes carregadores existe uma classificação para diferentes níveis de potência, são divididos em *on-board* e *off-board* com fluxo de energia unidirecional ou bidirecional, a topologia a ser utilizada irá depender da necessidade de projeto. (YILMAZ; KREIN, 2013) - (FERRO, 2018b)

### *2.6.2.1 Os níveis de potência do carregador*

Existem três níveis abordados nesse tópico, baseado nas normas dos Estados Unidos. Vários níveis de tensão e potência de carga foram definidos por diferentes organizações de padronização como: IEC 61851, IEC62196, SAE J1772 e os padrões do Código Nacional de Eletricidade dos EUA (NEC). Os níveis (1, 2 e 3) que estão ligados ao níveis de potência, pelo período de carregamento e também pela localização (*on-board* e *off-board*)(FERRO, 2018b).

O carregamento de nível 1 é o método mais lento. Neste nível é entregue uma baixa tensão e uma pequena corrente, comparado aos outros níveis. Geralmente utilizada

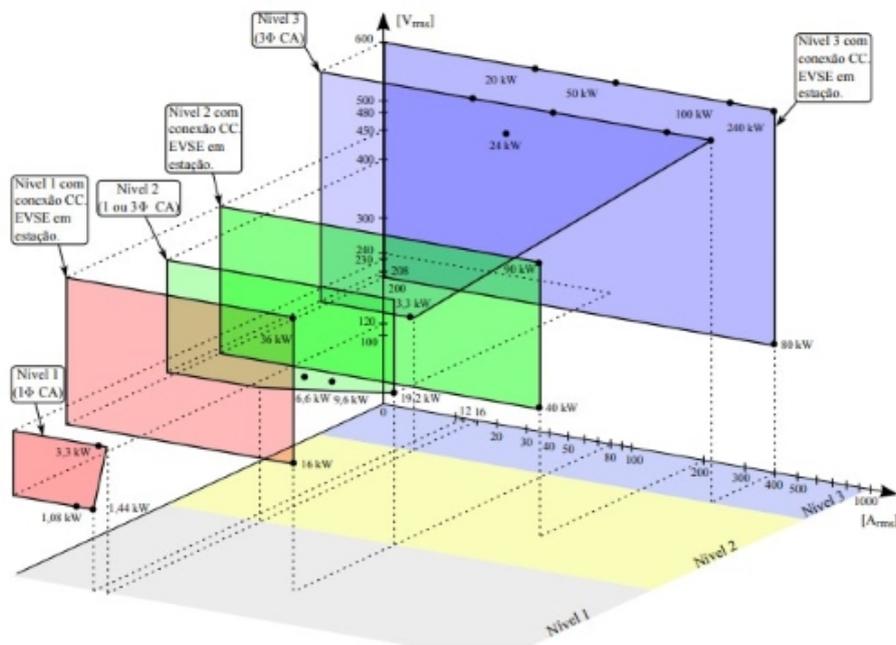
em residências, utiliza-se uma tomada aterrada monofásica, com uma tensão de 120 V alternado e 15 A a 20 A. Não precisa de nenhum equipamento caro para a sua instalação (YILMAZ; KREIN, 2013).

No nível 2, é o método principal para as instalações públicas e privadas. Este tipo de carregador, utiliza uma tensão de 240 V alternado e uma corrente de até 80 A. Nos EUA, a maioria das residências possuem um serviço de 240 V alternado, tem a possibilidade de carregar no período noturno, enquanto não estão sendo utilizados (FERRO, 2018b).

Por último, possui o nível 3, mais conhecido como carga rápida. Como os veículos elétricos tem a sua principal desvantagem a autonomia limitada e seu ciclo de carregamento demorado, este método foi criado para carregar um veículo elétrico com uma taxa de carregamento e um alto nível de corrente de carga (YILMAZ; KREIN, 2013). Neste carregamento é possível atingir os 80% o SoC (State of Charge) da carga. Este método é pouco utilizado em residência, por tanto, é mais utilizado em aplicações comerciais e públicas, sendo aplicados em estações de carregamento que são espalhados por uma cidade, em rodovia, postos de gasolina, geralmente sendo *off-board* sendo conectado à uma rede trifásica com uma tensão de 480 V alternado (FERRO, 2018b).

Os níveis citados acima, possuem uma grande diferença, sendo que, o carregamento rápido causa um sobrecarregamento o equipamento de distribuição local em horários de pico, além de aumentar as perdas no transformador. Já o nível 1 e 2, são equipamentos que pouco sobrecarregam a rede, pois, geralmente são utilizados no período da noite e possui uma baixa tensão (FERRO, 2018b). Na Figura 13 mostra-se diferentes métodos e níveis de potência de carregadores de bateria para veículos elétricos e híbridos aplicados na América do Norte, conforme a norma (SAE).

Figura 13 – Classificação de diferentes métodos e níveis de carregadores de bateria para carros elétricos e híbridos



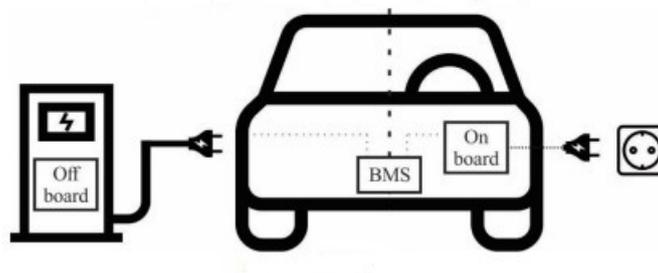
Fonte adaptada de (MORAES, 2018)

### 2.6.3 Carregadores *On-board* e *Off-board*

Os carregamentos de baterias, podem também, ser divididos em *On-board* e *Off-board*. Os carregadores *On-board* geralmente ficam localizados dentro dos veículos, são os carregadores de nível 1 de carga, devido ao seu custo, peso e espaço. Permitem que seus proprietários carreguem seus veículos elétricos sempre que encontrarem uma fonte de energia adequada para o carregamento. Também é desejado neste modelo que apresente um baixo peso e alta densidade de potência, já que toda a eletrônica de potência se encontra no veículo.

Já o carregador *off-board*, geralmente é visto em pontos estratégicos de uma cidade ou rodovias, precisa de uma grande infraestrutura de carregamento, com isso, reduz os requisitos de armazenamento e os custos (FERRO, 2018b). Abaixo na Figura 14 apresenta os dois tipos de carregadores especificados acima.

Figura 14 – Carregadores *on-board* e *off-board*



Fonte: (RONTEK, 2022)

#### 2.6.4 Carregadores unidirecionais e bidirecionais

A grande diferença entre ambos carregadores é pelo fato que, o carregador unidirecional pode apenas carregar, não podendo injetar energia na rede elétrica. No caso dos carregadores bidirecionais, eles possuem a tecnologia de conseguir fazer ambas as etapas, carregam e injetam energia na rede elétrica.

Os carregadores unidirecionais, usam uma ponte de diodo em conjunto com um filtro e conversores CC-CC. São implementados em um único estágio para limitar o custo, peso, volume e perdas. Transformadores de isolamento de alta frequência podem ser empregados quando necessário.

Os carregadores bidirecionais, possuem dois estágios, um com conversor bidirecional CA-CC que é conectado à rede ativa que fortifica o fator de potência e possui outro conversor CC-CC bidirecional, com a função de regular a corrente da bateria. Dependendo da utilidade, podem utilizar as topologias isoladas e não isoladas (YILMAZ; KREIN, 2013).

#### 2.6.5 Conversores empregados nos carregadores de bateria

Ainda que, hoje em dia existam diversas tecnologias, a complexidade dos carregadores e a falta de infraestrutura, juntando com a vida útil das baterias e seu alto custo. Os veículos elétricos possuem uma grande dificuldade para se consolidar no mercado automobilístico. Com isso, uma das principais necessidades, é a procura de carregados com baixo custo, para otimizar a entrada desses veículos no mercado. O carregador de bateria

desempenha um importante papel quando falamos de veículos elétricos, a otimização da carga, desempenho e principalmente, a velocidade do carregamento que estão ligados as características englobadas em um carregador.

A maiorias das topologias de conversores encontradas no mercado atualmente, segundo a literatura, cuja a tensão de entrada é alternada, isto é, uma topologia CA-CC. A utilização de tais topologias, tem o objetivo de realizar uma transferência de energia ininterrupta da rede elétricas para a bateria, sem perturbação na rede de alimentação e com rendimento otimizado, por conta que, a maioria dos carregadores possuem geralmente uma potência elevada. Um dos principais fatores para um bom desempenho de um carregador CA-CC, é sua taxa de distorção harmônica (TDH), junto com o fator de potência (FP). Considera-se que os carregadores são constituídos por um conversor CA-CC, conjunto com diodos em série com um conversor CC-CC, com a finalidade de fornecer uma tensão contínua para a bateria. Geralmente, a ponte de diodos utilizada na retificação da tensão, possui uma característica não linear, tendo um impacto contrário no perfil da potência de entrada. É muito comum a utilização de conversores CC-CC para a correção do fator de potência (FP) para obtenção de melhores resultados da taxa de distorção harmônica e ao FP.

Os problemas com a taxa de distorção harmônica (TDH) e fator de potência (FP) não são mais preocupações, restando apenas projetar um carregador eficiente, confiável, com grande faixa de tensão de entrada e saída, alta densidade e baixo custo (OLIVEIRA, 2014).

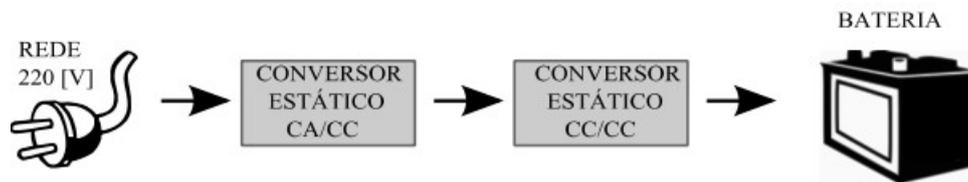
Com isso, muitos carregadores surgem com diferentes propostas, que são relacionadas a topologia e ao esquema de controle dos carregadores para a transferência de energia entre bancos de baterias, com a finalidade de obter o atendimento das normas e as necessidades tanto do fabricante e do consumidor. Com a grande demanda de novas tecnologias, vem aumentando gradativamente o estudo sobre essas topologias para a melhoria do desempenho desses carregadores, conjunto com o crescimento dos veículos elétricos no mercado automobilístico (RONTEK, 2022).

## **2.7 Topologias de conversores utilizados em carregadores de bateria para veículos elétricos**

Nos dias de hoje, há uma ampla variedade de topologias de conversores estáticos que são aplicados no carregamento de baterias. Inicialmente será feita uma análise de uma

estrutura de diagramas de blocos que se tornou a principal referência, baseando-se nas tendências do mercado de carregadores de baterias.

Figura 15 – Diagrama de blocos dos componentes do carregador de baterias



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

No diagrama da Figura 15, mostra-se de forma simplificada a estrutura de um carregador de baterias, neste esquema, o sistema conversor é dividido em dois estágios principais. No primeiro estágio possui um conversor estático CA-CC, também conhecido como pré-regulador, que possui a função de transformar a tensão alternada da rede em tensão contínua, que mantém um alto fator de potência. No estágio final, o conversor CC-CC, é normalmente isolado em alta frequência, que tem a função de realizar a adaptação da tensão de saída do primeiro estágio para a tensão do banco de baterias. Neste estágio basicamente se controla a tensão e a corrente de saída.

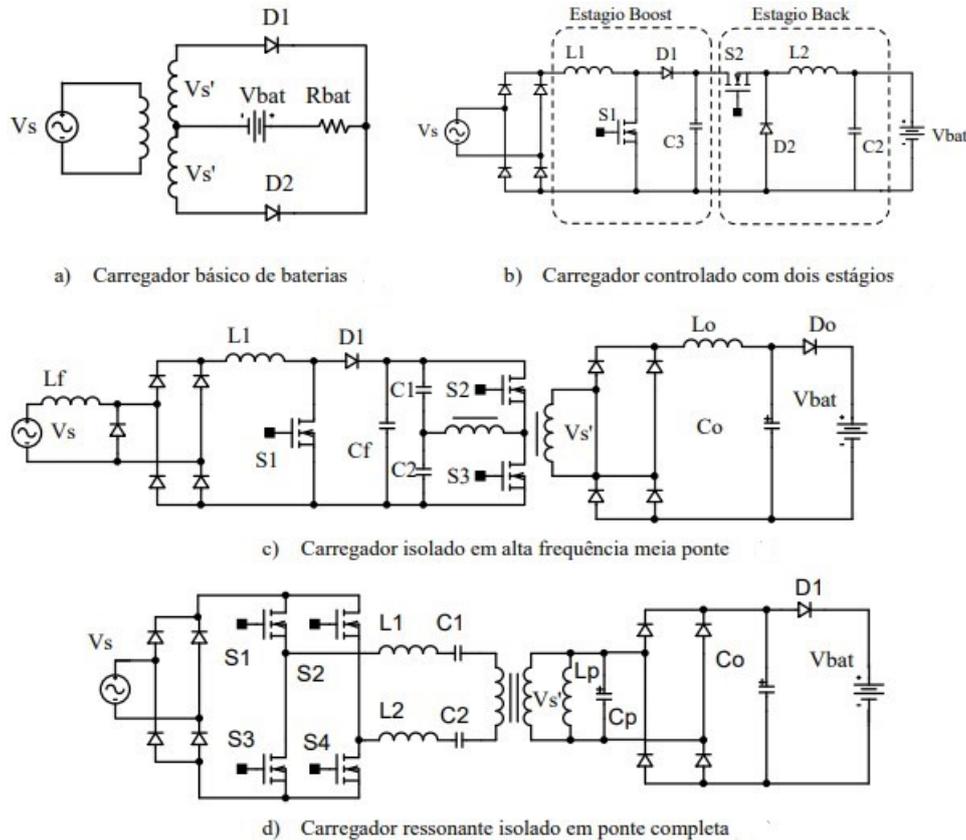
Em seguida, será apresentando o estado da arte das topologias utilizadas na implementação de carregadores de bateria. Abaixo, na Figura 16 (a) mostra-se uma topologia básica, que basicamente constitui-se de um transformador de baixa frequência com *tap* central e um retificador de onda completa no lado secundário. Nesta topologia não há correção de fator de potência (CFP), não permitindo também o controle de grandezas de saída aplicada à bateria.

Diferentes topologias são criadas e propostas por inúmeros autores com o objetivo de atender requisitos de um conversor para a aplicação em veículos elétricos, como será mostrado na Figura 16 (b), no qual possui um conversor monofásico de dois estágios. No primeiro estágio constitui-se de um conversor *boost* com CFP, e no segundo estágio encontra-se um conversor *buck*. Na Figura 16 (c) mostra outra topologia que é composta de dois estágios, no primeiro um conversor CA-CC *boost* convencional, geralmente usado apenas para obter CFP. No estágio final, possui um conversor CC-CC **half-bridge** isolado em alta frequência com retificador em ponte completa .

Também pode-se utilizar conversores ressonantes para aplicações de carregadores de bateria para veículos elétricos. Sendo assim, na Figura 16 (d) mostra-se um conversor CC-CC ressonante, possuindo uma ponte retificadora na entrada e um conversor ressonante

isolado em alta frequência com uma retificação em ponte completa na saída (LAFUENTE, 2011).

Figura 16 – Estado da arte das topologias usadas para carregadores de baterias



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

### 2.7.1 Topologias monofásicas de conversores CA-CC

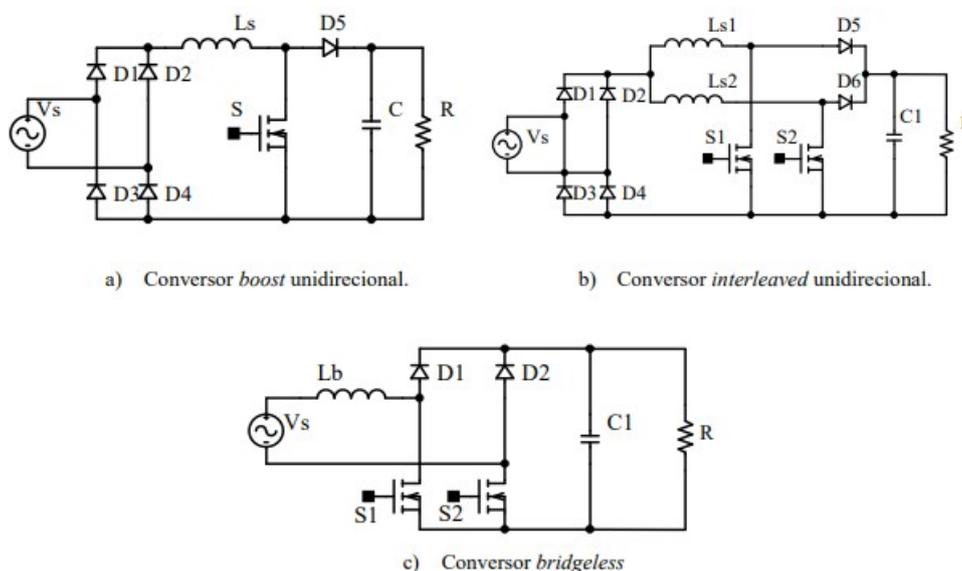
Na Figura 17 mostra algumas topologias distintas de circuitos monofásicos de potência que possuem atributos de retificar a forma de onda senoidal da rede, por isso a técnica de controle permite a realização da correção do fator de potência. Na Figura 17 é mostrado o conversor *boost* unidirecional na Figura 17 (a), que é difundido em inúmeras literaturas (LAFUENTE, 2011).

O conversor *interleaved* unidirecional é mostrado na Figura 17 (b), que tem a característica por possuir uma melhor capacidade de corrente de saída, retificando a tensão CA e permitindo um PFC.

Por fim é mostrada na Figura 17 (c), a topologia *Bridgeless*. A topologia é caracterizada por obter um pequeno número de componentes, tornando-se mais atrativo pelo

baixo valor, além de retificar a corrente de entrada. Possui uma descomplicação quando falamos de modulação e acionamento de interruptores.

Figura 17 – Possíveis topologias de conversores CA-CC para carregadores de veículos elétricos



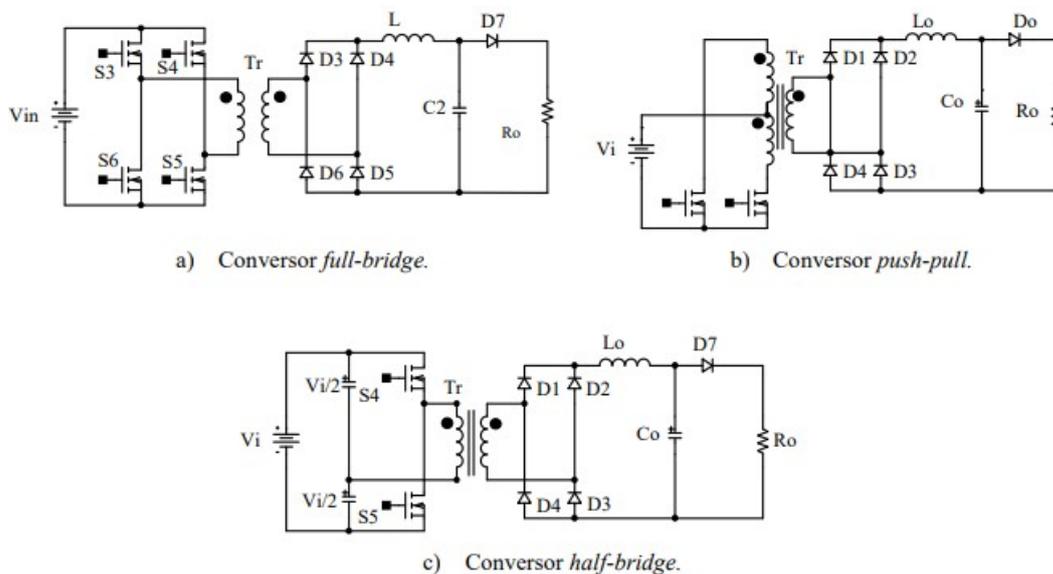
Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

### 2.7.2 Topologias monofásicas de conversores CC-CC

A Figura 18 mostra um grupo de conversores CC-CC, possuindo vastas topologias na literatura especializada. Escolhendo uma dessas topologias, surge o circuito que corresponde ao segundo estágio do carregador. Na Figura 18 (a) o conversor *full-bridge*, se caracteriza por ser utilizado principalmente em potências médias e por ser isolado em alta frequência.

Em outro exemplo, mostrado na Figura 18 (b), o circuito do conversor *push-pull*, derivado do conversor *forward* e se caracteriza por possuir um transformador de *tap* central no lado primário do transformado. Outro conversor conhecido desta topologia é *half-bridge* ou em meia ponte sendo isolado em alta frequência

Figura 18 – Possíveis topologias de conversores CA-CC para carregadores de veículos elétricos



Fonte adaptada de (LAFUENTE, 2011)

### 2.7.3 Conversor *buck interleaved*

A técnica *interleaved* se baseia na associação de conversores em paralelo, essa mesma proposta, foi originalmente, uma forma de superar algumas limitações tecnológicas dos componentes. Essa técnica é muito utilizada em conversores de energia (FERRO, 2018b).

Logo, a conversão *interleaved* se refere à interconexão de múltiplos conversores, sendo a frequência de chaveamento a mesmo para todos e os sinais de comando são defasados entre si. Neste tipo de conversão a amplitude da ondulação é reduzida e aumenta a frequência de ondulação efetiva do conversor sem gerar aumento nas perdas de comutação ou nas tensões do dispositivo. Então, o conversor *interleaved* requer menores requisitos de armazenamento de energia e filtragem, isso resulta em grandes densidades de conversão de potência melhoras que não afetam a eficiência. Também permite uma divisão de corrente entre os interruptores principais dessa estrutura. A conexão é, basicamente, organizada para aplicações em alta potência onde as divisões desses dispositivos são um fator limitante. Pode-se destacar que a técnica incrementada amplia-se para um número de conversores interligados, com a possibilidade de comandar interruptores com o mesmo sinal de comando (FERRO, 2018b).

## **2.8 Considerações Finais**

Neste capítulo, foi apresentada a fundamentação teórica que tem como objetivo justificar e dar uma base para engrandecimento do projeto e desenvolvimento de um carregador de baterias multifuncional. Inicialmente foi dedicado um estudo teórico sobre as baterias e seus principais aspectos, analisando princípios de cargas e funcionamento de cada uma delas, para obter o melhor tipo de bateria para o projeto. Também foi apresentado um estudo da breve história dos veículos elétricos, os tipos de veículos disponíveis no mercado, métodos de carregamento, seus níveis de carregamento. Por fim, obteve-se uma estudo do estado da arte dos conversores utilizados na atualidade.

## 3 METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO

### 3.1 Introdução

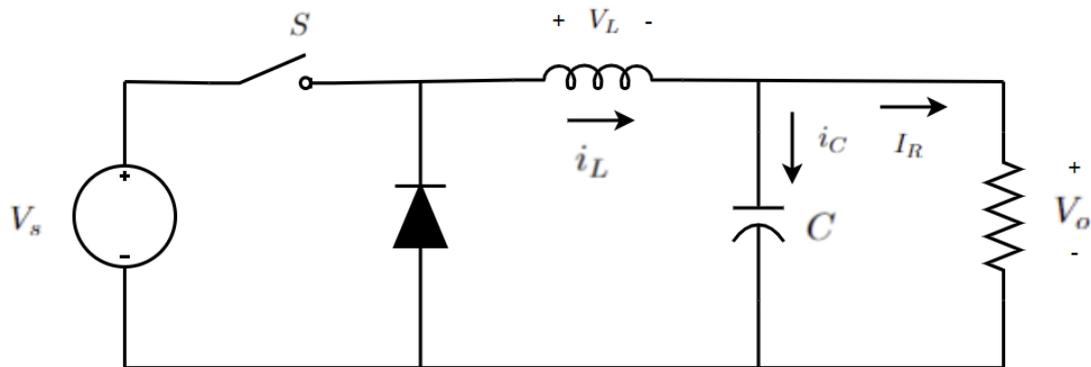
O objetivo deste capítulo é desenvolver um carregador de baterias eficiente utilizando a modelagem de um conversor CC-CC do tipo *Buck*. Este tipo de conversor é conhecido por converter uma tensão de entrada mais alta em uma tensão de saída mais baixa enquanto mantém uma alta eficiência energética. O projeto adequado de um conversor *Buck* é crucial para garantir a estabilidade e a eficiência do carregamento das baterias, proporcionando um controle preciso sobre a corrente e a tensão de saída. O objetivo deste projeto não é apenas estudar os fundamentos da eletrônica de potência, mas também inovar em suas aplicações práticas, via software Simulink. O objetivo é desenvolver um carregador confiável e eficiente para uma variedade de usos.

### 3.2 Conversor Buck

Conversores CC-CC são dispositivos eletrônicos, que denominada tensão ou corrente contínua ocorrerá uma conversão para um nível diferente de tensão e corrente. Geralmente, essas conversões são obtidas com uma combinação de um indutor e capacitor e um dispositivo de estado sólido que opere no modo chaveamento em alta frequência (AHMED, 2009).

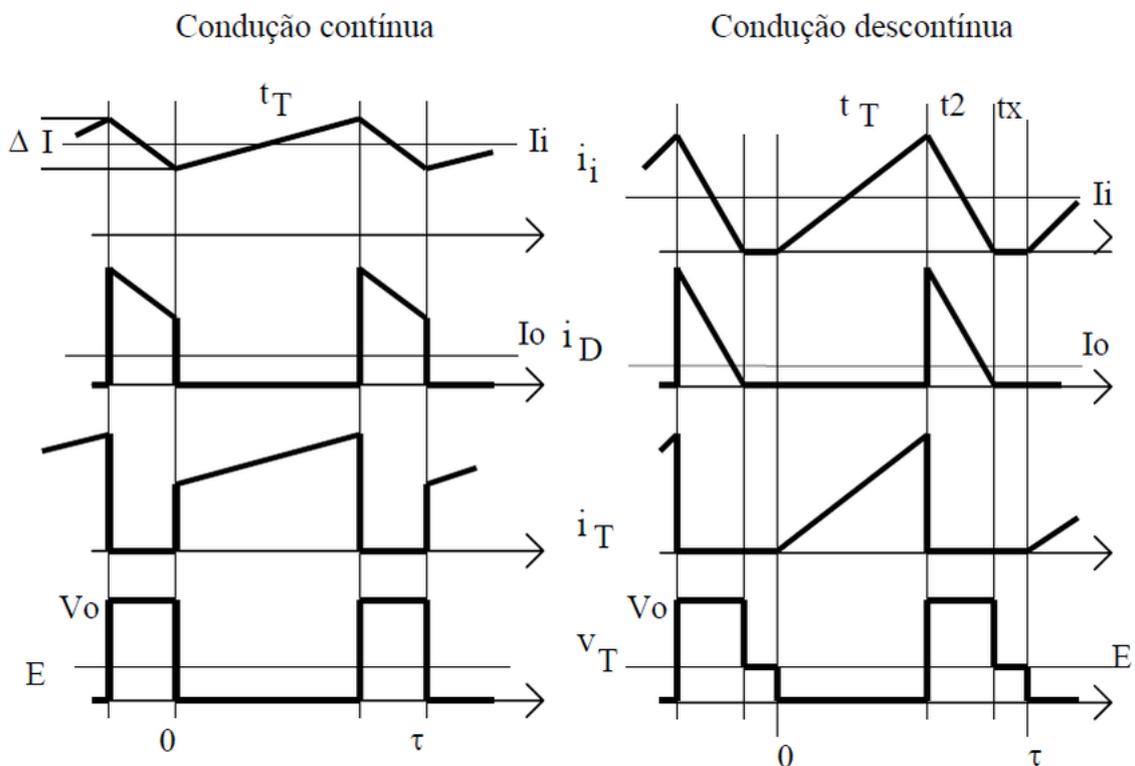
Portando, a topologia *buck* é um conversor CC-CC também conhecido como *Step-down* ou abaixador de tensão, diminui sua tensão de entrada para a saída regulando conforme a necessidade, neste mesmo processo a corrente será elevada (AHMED, 2009). Na Figura 19, apresenta-se uma topologia tipo *buck*.

Figura 19 – Circuito de um Conversor Buck



Fonte: Próprio autor.

Conversores CC-CC possuem dois modos de condução, conhecidos como: modo contínuo e o outro de modo descontinuo (AHMED, 2009). Na Figura 20 é apresentado as típicas formas de onda em ambos os modos de condução do conversor *buck* na Figura 20:

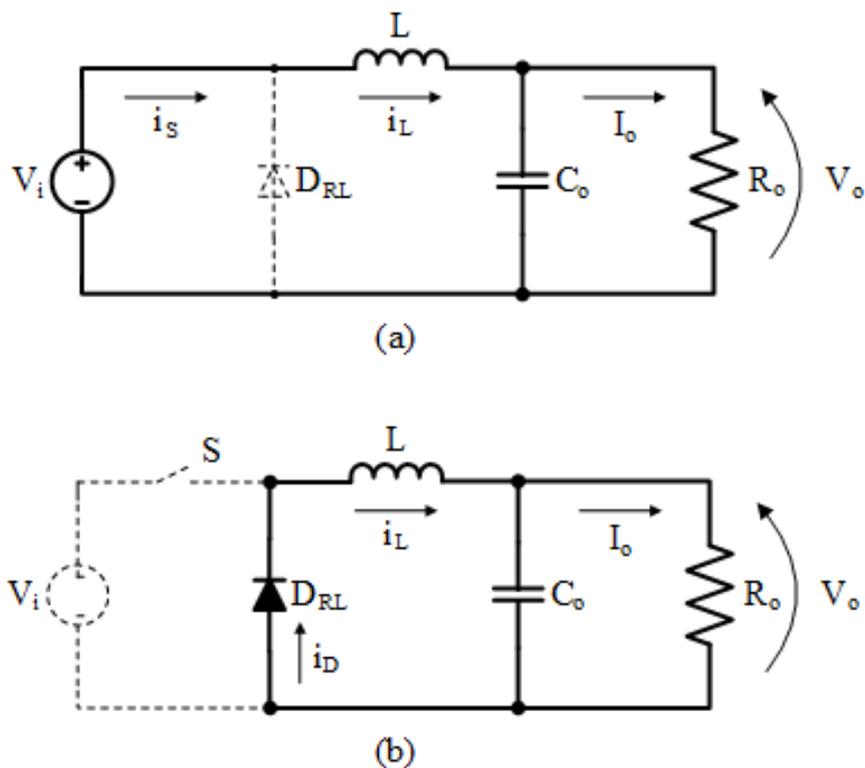
Figura 20 – Forma de onda de um Conversor *buck*

Fonte: Próprio autor.

### 3.2.1 Modo de condução contínua (MCC)

A chave seccionadora pode assumir dois estados, conduzindo ou bloqueado. Dessa forma quando a chave estiver aberta, a tensão de entrada será bloqueada pela chave, por conta do filtro, a tensão de saída é constante. Quando essa chave é fechada, o diodo fica reversamente polarizado, com isso a fonte transfere energia para o indutor (L) e para o capacitor (C) (NICOLLI, 2019).

Figura 21 – Etapas do modo de condução contínua



Fonte: Imagem adaptada de (RONTEK, 2022).

Quando a chave está em condução o indutor fica conectado entre a fonte de alimentação de entrada e o capacitor de saída. Considerando a aproximação por baixa ondulação na tensão de saída, as expressões que definem a tensão no indutor ( $V_L$ ) e a corrente no capacitor ( $i_C$ ), nesse subintervalo, são dadas por (1) e (2) respectivamente.

$$V_L = V_i - V_o \quad (2)$$

$$i_C = i_L - I_o = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (3)$$

Durante a segunda etapa, um dos terminais do indutor é conectado ao terra do circuito, como se verifica na Figura 21. A tensão no indutor e a corrente no capacitor são dadas por (4) e (5), respectivamente:

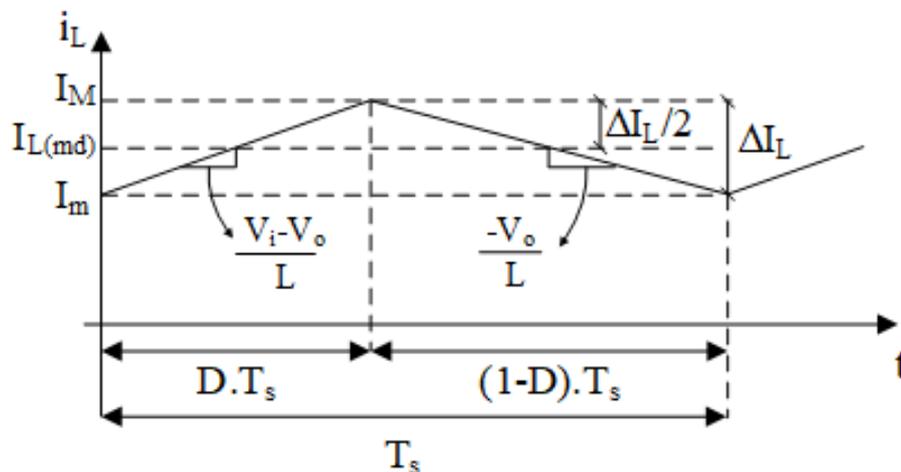
$$V_L = -V_o \quad (4)$$

$$i_C = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (5)$$

### 3.2.2 Dimensionamento dos elementos passivos

O próximo passo é obter as expressões para o dimensionamento dos elementos do circuito é o próximo passo para finalizar a análise em MCC. Iniciaremos com o projeto do indutor (FISCH, 2018a).

Figura 22 – Forma de onda da corrente do indutor.



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018a).

#### 3.2.2.1 Projeto do Indutor

Para o dimensionamento do indutor, utilizamos as informações fornecidas pela Figura 22 e equacionamos as variáveis correspondentes. A equação que determina o valor do indutor é dada por:

$$L = \frac{(V_i - V_o)D}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (6)$$

Nesta equação,  $L$  é a indutância,  $V_i$  é a tensão de entrada,  $V_o$  é a tensão de saída,  $D$  é o ciclo de trabalho (duty cycle),  $f$  é a frequência de comutação, e  $\Delta I$  é a ondulação de corrente no indutor.

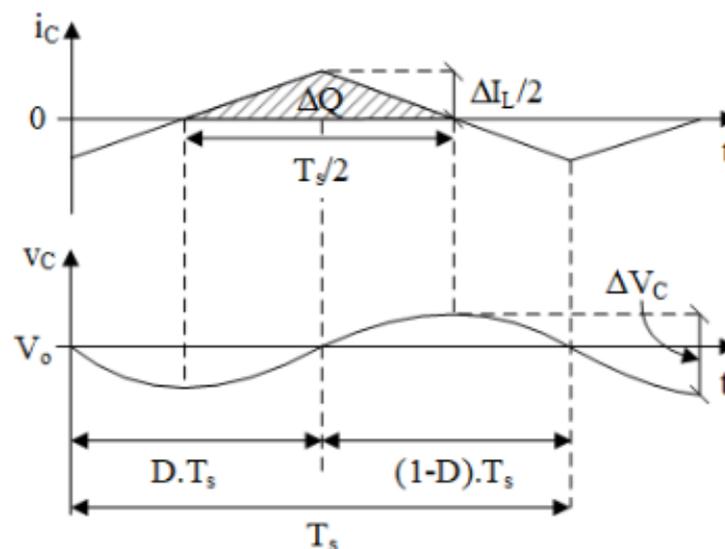
Escolher um valor de indutância que mantenha a ondulação de corrente dentro dos limites especificados é essencial para garantir que o conversor funcione corretamente. A ondulação de corrente, ou  $\Delta I_L$ , é a diferença entre a corrente máxima e a corrente mínima do indutor durante um ciclo de comutação.

No modo de condução contínua (MCC), a corrente média do indutor deve ser igual à corrente média de saída. No entanto, uma pequena ondulação na corrente é normalmente aceitável e o valor médio da corrente pode ser aproximado, o que simplifica os cálculos e permite uma análise mais direta do comportamento do circuito.

### 3.2.2.2 Projeto do capacitor

Como a corrente do capacitor é apenas a componente CA da corrente do indutor, a aproximação por baixa ondulação na tensão facilita a análise, mas dificulta o dimensionamento do capacitor em conversores com filtro LC de saída. A corrente do indutor tem um valor médio  $I_{md}$  e uma ondulação  $\Delta I_L$ . Quando a frequência de chaveamento é baixa, a maior parte da ondulação passa pelo capacitor. As formas de onda de tensão e corrente no capacitor de saída do conversor Buck são mostradas na Figura 23 (FISCH, 2018a).

Figura 23 – Formas de onda de corrente e ondulação de tensão no capacitor.



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018a).

Com base nas informações fornecidas pela Figura 23, ao equacionar cada variável disponível, obtemos a seguinte expressão para o cálculo do capacitor  $C$  no circuito:

$$C = \frac{1 - D}{8 \cdot f_s^2 \cdot L \cdot \left(\frac{\Delta V_c}{V_o}\right)} \quad (7)$$

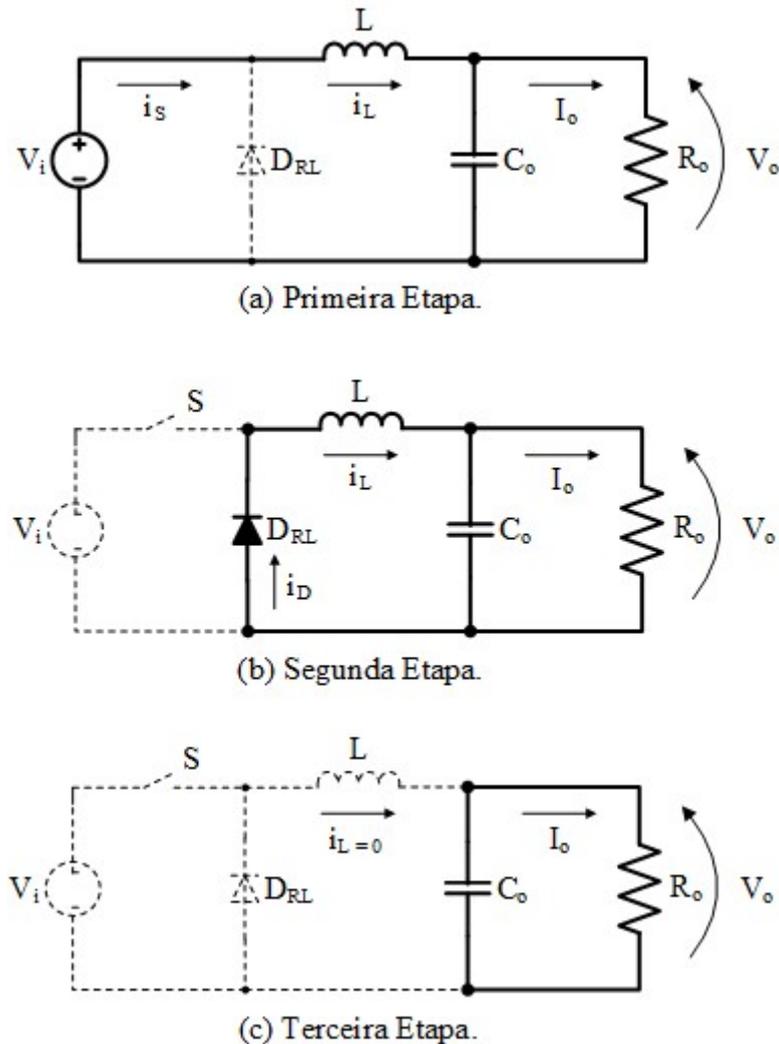
Nesta equação,  $C$  representa a capacitância necessária,  $D$  é o ciclo de trabalho (duty cycle),  $f_s$  é a frequência de comutação,  $L$  é a indutância,  $V_c$  é a amplitude da tensão de ripple no capacitor, e  $V_o$  é a tensão de saída do conversor.

É crucial dimensionar o capacitor adequadamente para garantir a estabilidade e eficiência do conversor. A amplitude da tensão de ripple no capacitor,  $\Delta V_c$ , depende da carga e das características do filtro LC de saída. A Figura 19 fornece um guia visual das variáveis envolvidas, facilitando o dimensionamento preciso do capacitor para o projeto do conversor Buck.

### 3.2.3 Modo de condução descontínua (MCD)

Neste modo, o conversor *buck* é caracterizado por três etapas de funcionamento. Abaixo, na Figura 24 estão representadas todas as etapas

Figura 24 – Etapas do modo de condução descontínua



Fonte: Imagem adaptada de (RONTEK, 2022).

Na primeira etapa inicia-se no momento que a chave S é colocada em condução, o que levará o diodo  $D_{RL}$  ao bloqueio. Com isso, a fonte de entrada  $V_i$  começa a transferir energia ao indutor e para o capacitor. Essa etapa é finalizada quando a chave S é aberta (RONTEK, 2022).

$$V_L = V_i - V_o \quad (8)$$

$$i_c = i_L - I_o = i_L - \frac{V_e}{R_o} \quad (9)$$

Seguindo para a segunda etapa, quando a chave S é bloqueada o diodo  $D_{RL}$  naturalmente entra em condução e fornece passagem à corrente do indutor. Por fim, a energia armazenada no indutor é entregue ao capacitor e à carga (RONTEK, 2022).

$$V_L = -V_o \quad (10)$$

$$i_c = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (11)$$

Por fim, na última etapa terá início quando a corrente no indutor se anula. Com isso, o diodo bloqueia e a carga começa a receber energia do capacitor  $C_o$  (RONTEK, 2022).

$$v_L = 0 \quad (12)$$

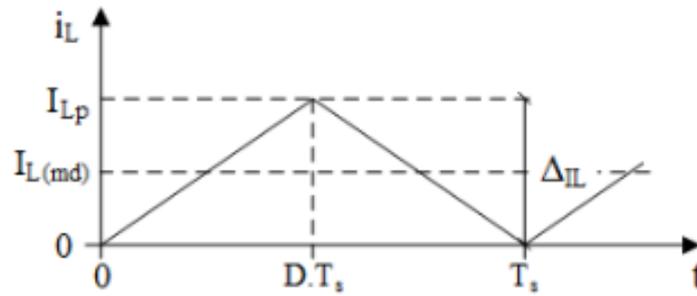
$$i_C = -\frac{V_o}{R_o} \quad (13)$$

Analisando esses casos deste conversor, pode-se tirar uma base de qual é a sua função, seu comportamento, componentes inseridos no circuito.

### 3.2.4 Cálculo do indutor

Neste modo de operação, o indutor é escolhido para ter um valor abaixo da indutância crítica ( $L_{cr}$ ), garantindo a descontinuidade da corrente. A indutância crítica é calculada quando  $D_3.T_3 = 0$ , significando que a corrente no indutor toca zero, mas não permanece nesse valor, caracterizando o modo de condução crítica. A Figura 25 mostra a forma de onda da corrente no indutor nessa condição (FISCH, 2018a).

Figura 25 – Corrente no indutor para condição crítica



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018a).

Observando a Figura 25, a ondulação de corrente ( $\Delta I_L$ ) se equivale à corrente de pico. Conhecendo a corrente de pico, pode-se escrever a seguinte relação:

$$\Delta I_L = 2 \cdot I_o = \frac{(V_i - V_o) \cdot D}{f_s \cdot L} = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{f_s \cdot L} \quad (14)$$

Com o  $L$  sendo isolado, determina-se o valor da indutância crítica ( $L_{cr}$ ) do sistema, dada pela equação:

$$L_{cr} = \frac{(V_i - V_o) \cdot D}{2 \cdot f_s \cdot I_o} = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{2 \cdot f_s \cdot I_o} \quad (15)$$

Com isso, as equações abaixo podem ser estabelecidas:

$$L < L_{cr} = \frac{R_o(1 - D)}{2f_s} \rightarrow \text{Condução Descontínua} \quad (16)$$

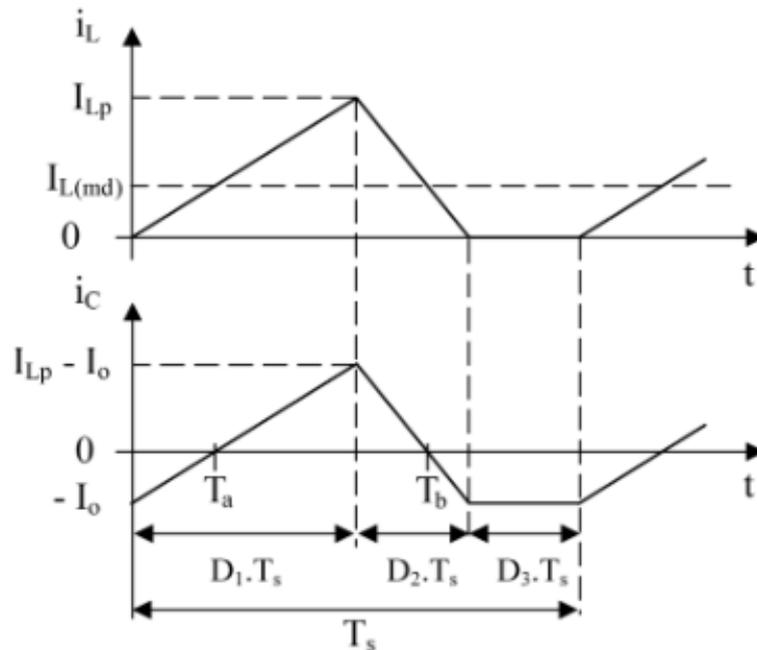
$$L = L_{cr} = \frac{R_o(1 - D)}{2f_s} \rightarrow \text{Condução Crítica} \quad (17)$$

$$L > L_{cr} = \frac{R_o(1 - D)}{2f_s} \rightarrow \text{Condução Contínua} \quad (18)$$

### 3.2.5 Cálculo do capacitor

Ao contrário do modo de condução contínua, no modo descontínuo existe uma ondulação expressiva na corrente do indutor. Considerando que o filtro LC de saída foi projetado corretamente, toda componente alternada de  $i$ , passará pelo capacitor (FISCH, 2018a), como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Etapas do modo de condução descontínua



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018a).

Observando a Figura 26 pode chegar na Equação (18)

$$C \geq \frac{(\Delta I_L - I_o) \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_C} \quad (19)$$

### 3.3 Topologia e descrição do carregador proposto

Devido à natureza da rede elétrica que fornece tensão alternada (CA), a maioria dos carregadores CC-CC (conversores DC-DC) é usado para fornecer tensão e corrente constantes. O objetivo deste projeto é desenvolver um carregador de baixa potência. O carregador sugerido será alimentado por uma rede elétrica bifásica com tensão de 220 V e frequência de 60 Hz. Uma bateria de íon de lítio (LiFeMgPO<sub>4</sub>) será o componente do banco de baterias. O objetivo principal do projeto é desenvolver um carregador de carga lenta que possa carregar uma bateria de 12,8 V e 40 Ah. O software *Simulink* fornece o modelo da bateria usada.

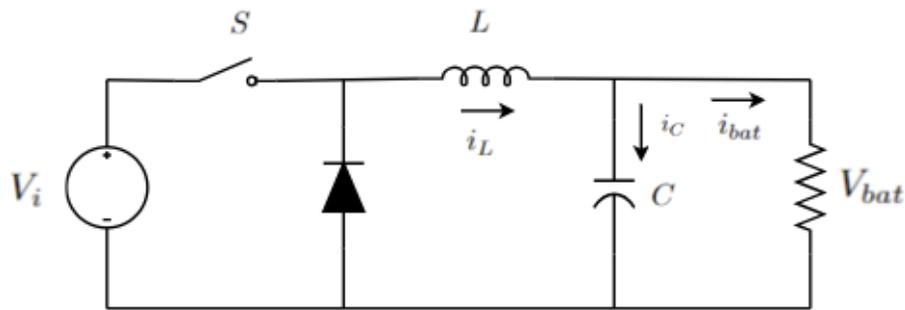
Será realizada uma análise abrangente do comportamento do carregador em vários cenários usando os softwares *MATLAB* e *Simulink*.

O conversor buck (CC-CC) manterá a tensão e a corrente constantes até o banco de baterias na topologia sugerida. O carregador foi alimentado por uma fonte de tensão de 48

V.

Esta topologia foi escolhida porque é simples e tem poucos componentes, tornando o conversor mais ajustável. Além de facilitar a implementação e a manutenção, essa simplicidade reduz os custos e aumenta a eficiência do sistema. A Figura 27 representa a topologia utilizada no projeto.

Figura 27 – Conversor *buck*



Fonte: Próprio autor.

### 3.4 Cálculo do *Ripple* e razão cíclica do projeto

Neste projeto, foi necessário calcular o *Ripple* da tensão e da corrente. De acordo com (ERICKSON, 1999), considera-se 2% da tensão da bateria, que neste caso é 12,8V. O cálculo é realizado utilizando a equação (18):

$$C = \frac{\Delta i_L \cdot T_s}{8 \cdot \Delta v} \quad (20)$$

Para o cálculo do *Ripple* da corrente, considera-se 5% da corrente da bateria, que neste caso é 40Ah. Esse cálculo é dado pela equação (19):

$$L = \frac{V_s - V}{2\Delta I} \cdot DT_s \quad (21)$$

Para emular um conversor que produza correntes variáveis, deseja-se operar o conversor no modo de condução contínua (MCC). O ganho estático do conversor é a própria razão cíclica de operação.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (22)$$

### 3.5 Modelo Dinâmico do Conversor *Buck*

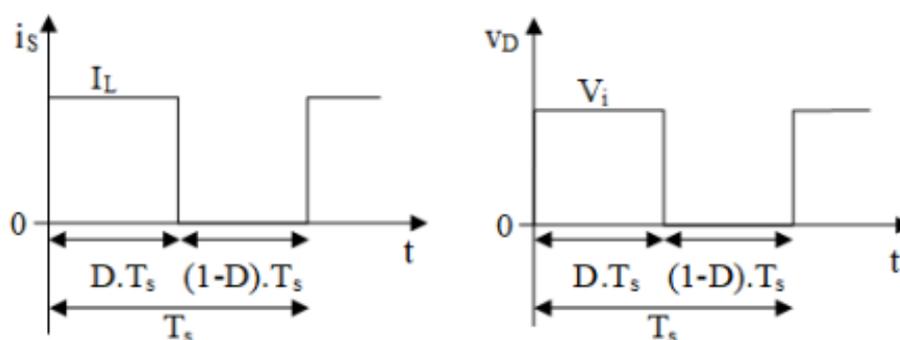
A descontinuidade produzida pelo processo de chaveamento é o primeiro problema que surge na modelagem de conversores estáticos. A combinação dessa descontinuidade com outras não linearidades do circuito torna impossível usar diretamente as ferramentas usadas na análise de circuitos lineares. O tempo de chaveamento é geralmente muito menor que as constantes de tempo do conversor, felizmente. Isso permite que as grandezas instantâneas sejam aproximadas de seus valores médios, que foram calculados para um período de chaveamento, sem perder informações relacionadas à dinâmica que se deseja controlar (FISCH, 2018b).

De acordo com a abordagem apresentada, essa abordagem implica a utilização de fontes que são dependentes de tensão ou corrente em vez dos semicondutores passivos e ativos, que são os elementos não lineares do circuito.

#### 3.5.1 Modelo Médio de Grandes Sinais

Primeiramente, usa-se fontes de tensão para substituir elementos em paralelo e fontes de corrente para determinar as formas de onda de tensão e corrente nos semicondutores. As formas de onda da chave (i) e do diodo (v) com baixa ondulação na corrente do indutor são mostradas na Figura 28.

Figura 28 – Formas de onda simplificadas de corrente e tensão



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018b).

Para eliminar a descontinuidade, usa-se o operador média móvel para calcular valores médios quase instantâneos das grandezas durante um período de chaveamento. Isso pode ser feito dividindo uma área em uma onda e dividindo-a pelo período (ERICKSON,

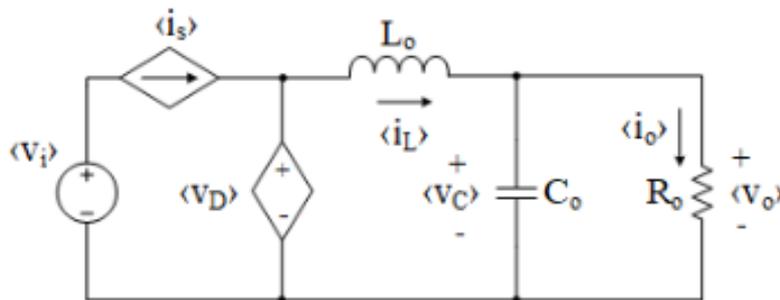
1999). A corrente da chave e a tensão do diodo, conforme descrito nas Equações (X) e (X), são as grandezas médias resultantes.

$$\langle i_S \rangle = I_L \cdot d = \langle i_L \rangle \cdot d \quad (23)$$

$$\langle v_D \rangle = V_i \cdot d = \langle v_i \rangle \cdot d \quad (24)$$

Agora que o modelo médio de sinais foi equacionado, podemos substituir o transistor e o diodo por fontes dependentes tanto de tensão e de corrente, cujos os valores são obtidos através das equações acima.

Figura 29 – Modelo médio de grande sinais



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018b).

### 3.5.2 Modelo Médio de Pequenos sinais (Linear)

A descontinuidade da corrente e da tensão nos semicondutores é eliminada pelo modelo médio de grandes sinais, mas devido às variações temporais de  $i$ ,  $v$  e  $d$ , ele continua não linear. O modelo médio de pequenos sinais é criado quando o sistema é linearizado para pequenas variações ao redor de um determinado ponto de operação (FISCH, 2018b).

A linearização pode ser alcançada expandindo as funções não lineares usando a série de Taylor. Isso apenas leva em consideração os termos lineares. Alternativamente, é possível considerar o conversor como linear em torno de um ponto de operação  $X$  (valor CC). Isso é possível porque as perturbações (parcela CA) são pequenas, o que permite que a soma dessas parcelas, conforme nas equações abaixo, seja usada para determinar todas as variáveis dinâmicas (FISCH, 2018b).

$$\begin{aligned}
\langle i_S \rangle &= I_S + \hat{i}_S \\
\langle V_D \rangle &= V_D + \hat{v}_D \\
\langle i_L \rangle &= I_L + \hat{i}_L \\
\langle v_i \rangle &= V_i + \hat{v}_i \\
d &= D + \hat{d}
\end{aligned} \tag{25}$$

Substituindo a linearização descrita em (25) nas variáveis (23) e (24), obtém-se:

$$I_S + \hat{i}_S = (I_L + \hat{i}_L) \cdot (D + \hat{d}) = I_L \cdot D + I_L \cdot \hat{d} + \hat{i}_L \cdot D + \hat{i}_L \cdot \hat{d} \tag{26}$$

$$V_D + \hat{v}_D = (V_i + \hat{v}_i) \cdot (D + \hat{d}) = V_i \cdot D + V_i \cdot \hat{d} + \hat{v}_i \cdot D + \hat{v}_i \cdot \hat{d} \tag{27}$$

Observa-se que o produto está entre duas variáveis CA nos resultados, como é o caso do produto  $\hat{v}_L \cdot \hat{d}$ . No entanto, esse termo não é linear e de ordem superior, pois parte da premissa de que as perturbações podem ser ignoradas porque seu valor é quase insignificante em relação à componente CC porque são significativamente menores do que os valores no ponto de operação. Assim, as equações (26) e (27) resultam em termos de ordem zero e primeira ordem conforme:

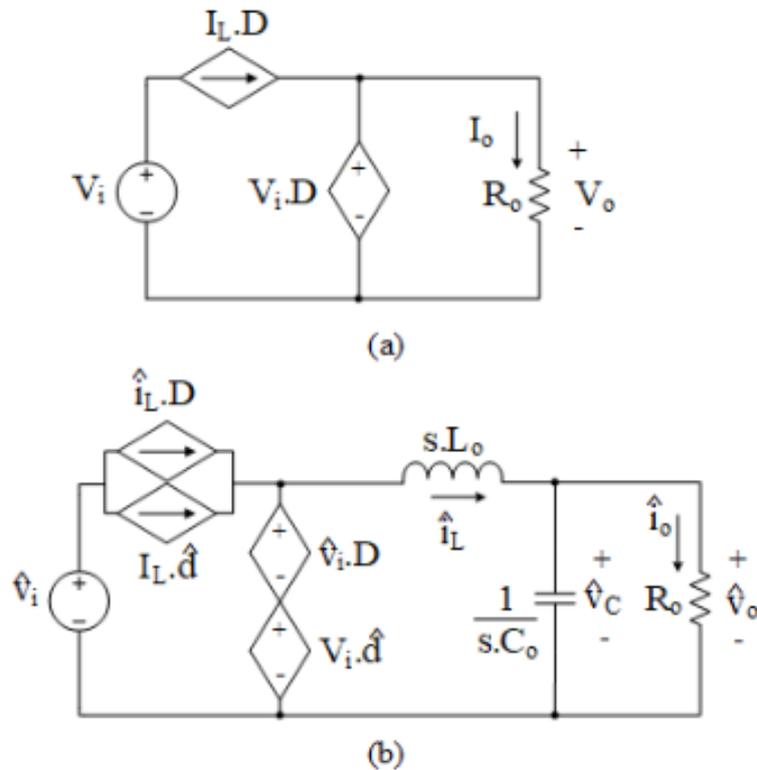
$$I_S + \hat{i}_S = I_L \cdot D + I_L \cdot \hat{d} + \hat{i}_L \cdot D \tag{28}$$

$$V_D + \hat{v}_D = V_i \cdot D + V_i \cdot \hat{d} + \hat{v}_i \cdot D \tag{29}$$

O modelo bilinear do conversor Buck em modo de condução contínua é obtido ajustando as equações (28) e (29) no circuito equivalente mostrado na Figura 28. Este modelo captura condições de operação dinâmicas e estáticas. O modelo é dividido em dois para facilitar a análise: um para pequenas variações e outro para o estado estacionário. Isso requer a separação dos componentes de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) nas equações mencionadas anteriormente.

A Figura 30-a mostra o modelo linearizado do ponto de operação em regime permanente, onde o indutor funciona como um curto-circuito e o capacitor funciona como um circuito aberto. Como mostrado na Figura 30-b, a dinâmica desses componentes é levada em consideração pelo modelo de pequenas variações.

Figura 30 – Modelo CC linearizado



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018b).

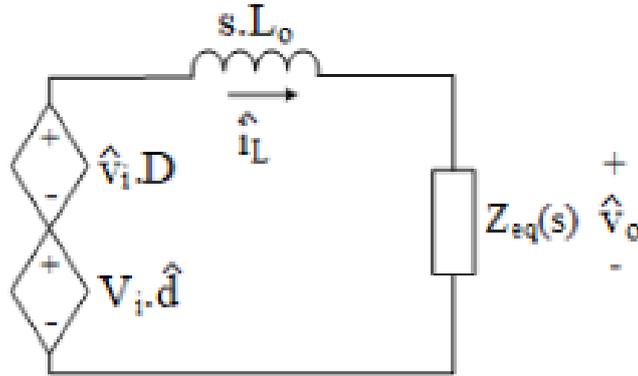
### 3.5.3 Função de transferência para controle da tensão de saída

Para controlar a tensão de saída de um conversor CC-CC, necessita-se de uma função de transferência que relaciona pequenas flutuações na tensão de saída  $\hat{v}_o(s)$  com as da razão cíclica  $\hat{d}(s)$ . O controlador ajusta a razão de ciclo do modulador PWM para controlar a tensão de saída.

Pode-se simplificar o circuito da Figura 30-b Aplicando a impedância equivalente da saída  $Z_{eq}(s)$ . Na Figura 31 representa o circuito simplificado.

$$Z_{eq} = \frac{R_o}{R_o \cdot C_o \cdot s + 1} \quad (30)$$

Figura 31 – Circuito equivalente de pequenos sinais



Fonte: Imagem adaptada de (FISCH, 2018b).

Através do circuito equivalente, a tensão de pode ser obtida pela teoria de divisor de tensão:

$$\hat{v}_o(s) = [\hat{v}_i(s) \cdot D + V_i \cdot \hat{d}(s)] \cdot \left[ \frac{Z_{eq}(s)}{s \cdot L_o + Z_{eq}(s)} \right] \quad (31)$$

Logo,

$$\hat{v}_o(s) = \frac{V_i}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \cdot \hat{d}(s) + \frac{D}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \cdot \hat{v}_i(s) \quad (32)$$

A partir da equação (32) se conclui que oscilações na tensão de saída não dependem somente das oscilações da razão cíclica, mas também das oscilações na tensão de entrada  $\hat{v}_i(s)$ . Como o sistema é linear, é possível analisar cada perturbação de forma independente. Relacionando a tensão de saída com a de entrada, teremos:

$$G_{vv}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} = \frac{D}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \quad (33)$$

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_i}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \quad (34)$$

### 3.5.4 Função de transferência para o controle da corrente no indutor

Podemos encontrar a função de transferência para o controle da corrente no indutor usando o mesmo circuito mostrado na Figura 31. Isso é feito usando a razão cíclica. Isso

nos permite escrever usando uma tensão de entrada constante:

$$\frac{V_i \cdot \hat{d}(s)}{s \cdot L_o + Z_{eq}(s)} = \frac{V_i \cdot \hat{d}(s) \cdot (C_o \cdot s + \frac{1}{R_o})}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \quad (35)$$

Assim, a função de transferência relaciona a razão cíclica  $G_{id}(s)$  com as perturbações de pequenos sinais da corrente do indutor é dada por:

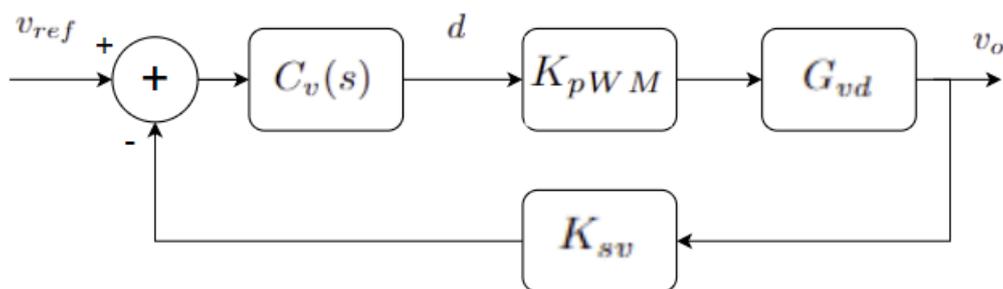
$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_i \cdot (C_o \cdot s + \frac{1}{R_o})}{L_o \cdot C_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} \cdot s + 1} \quad (36)$$

Após equacionar  $G_{id}$  e  $G_{vd}$ , podemos dividir  $G_{vd}$  com  $G_{id}$  e teremos Equação (37).

$$G_{iv}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_i(s)} = \frac{D \cdot (s \cdot C + \frac{1}{R_o})}{L \cdot C \cdot s^2 + s \cdot \frac{L}{R_o} + 1} \quad (37)$$

A Figura 32 mostra o diagrama de blocos do controlador de tensão de tensão de saída e a planta  $G_{vd}$  em malha fechada.

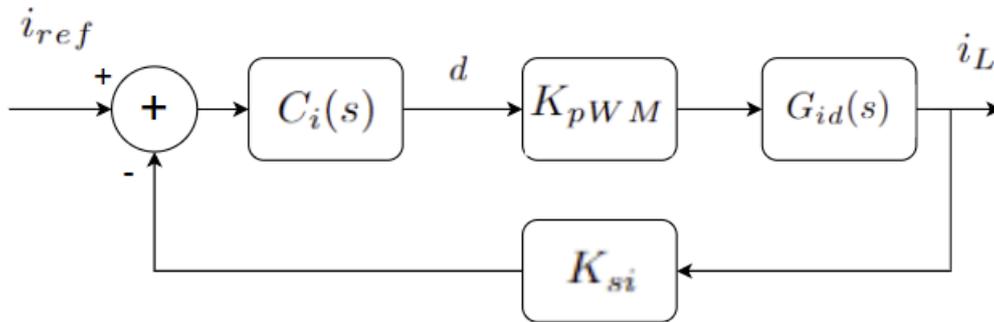
Figura 32 – Diagrama de blocos para de controle da tensão de saída



Fonte: Proprio autor.

Na Figura 33 mostra o diagrama de blocos do controlador de corrente de saída e a planta  $G_{id}$  em malha fechada.

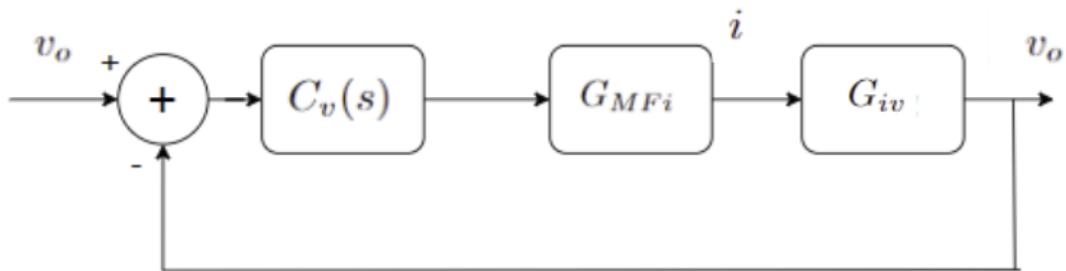
Figura 33 – Diagrama de blocos da corrente do indutor



Fonte: Proprio autor.

A Figura 34 mostra o diagrama de blocos de um sistema multimalhas com externa de controle de tensão e corrente  $G_{iv}$ .

Figura 34 – Diagrama de blocos de controle de multimalhas para controle de  $v_o$



Fonte: Proprio autor.

### 3.6 Projeto do Compensador

O projeto do compensador será dimensionado a partir do método de resposta em frequência. Esse método consiste em determinar a frequência de cruzamento e a margem de fase para garantir a estabilidade do sistema. No primeiro momento, analisa-se a função de transferência de malha fechada.

$$FTMF(s) = \frac{i_L}{i_{ref}} = \frac{G_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot C_i(s)}{1 + C_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_i(s) \cdot G_i} \quad (38)$$

Os polos de malha fechada são dados por:

$$1 + C_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_i(s) \cdot G_i = 0 \quad (39)$$

$$C_i(s) \cdot K_{\text{PWM}} \cdot G_i(s) \cdot G_i = -1 \quad (40)$$

Definindo a função de transferência de malha aberta não compensada  $FTMA_{NC}(s)$  como sendo o produto dos termos da malha aberta sem considerar o compensador (40) e a função de transferência de malha aberta compensada  $FTMAC(s)$  considerando o compensador (41), pode-se reescrever (39) como a expressão (42). Para análise pelo método da resposta em frequência, considera-se o sistema operando em regime permanente senoidal ( $s = j\omega$ ):

$$FTMA_{NC}(\omega) = K_{\text{PWM}} \cdot G_i(\omega) \cdot G_i \quad (41)$$

$$FTMAC(\omega) = C_i(\omega) \cdot K_{\text{PWM}} \cdot G_i(\omega) \cdot G_i \quad (42)$$

$$FTMAC(\omega) = C_i(\omega) \cdot FTMA_{NC}(\omega) = -1 \quad (43)$$

Dado que  $FTMANC(s)$  não apresenta polos na origem, o compensador deve integrar o sinal de erro para obter erro nulo para entrada em degrau. Assim, definiu-se um compensador proporcional-integral (PI), descrito por (44), para fornecer dois graus de liberdade ( $k_p$  e  $k_i$ ):

$$C_i(s) = \frac{k_p(s + k_i)}{s} \quad (44)$$

Partindo de (43), obtém-se:

$$FTMAC(\omega) = \frac{k_p(s + k_i)}{s} \cdot FTMA_{NC}(\omega) \quad (45)$$

Após as devidas manipulações matemáticas, obtemos:

$$k_p = \frac{\omega_C}{\sqrt{k_i^2 + \omega_C^2} \cdot |FTMANC(\omega_C)|} \quad (46)$$

$$k_i = \frac{\omega_C}{\tan(M_\phi - 90^\circ - \angle FTMA_{NC}(\omega_C))} \quad (47)$$

A determinação dos parâmetros do compensador foi feita alocando a frequência de cruzamento em  $f_C = 2$  kHz.

$$k_v = 0.0901 \quad (48)$$

$$k_i = 113,2728 \quad (49)$$

### 3.7 Controle PI no Carregamento de Baterias

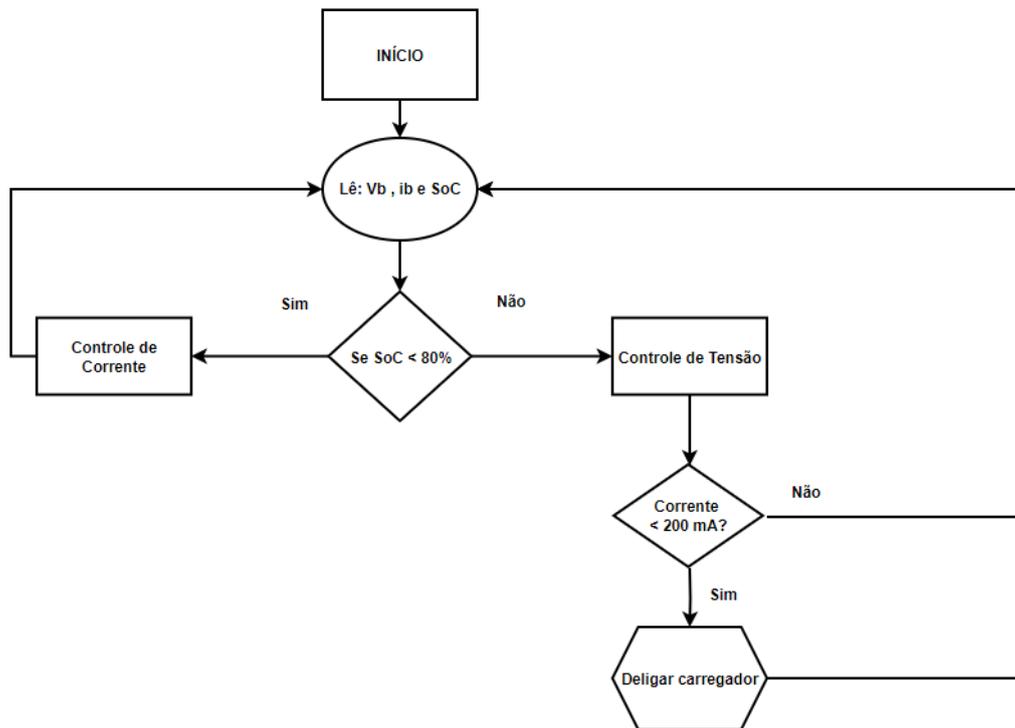
O funcionamento do carregador de bateria envolve a implementação de dois controladores PI: um para corrente e outro para tensão.

Inicialmente, o sistema verifica o Estado de Carga (SoC) da bateria, expresso em porcentagem (%). Após essa verificação inicial, os controladores são ativados. Quando a carga da bateria está abaixo de 80%, o controlador de corrente é acionado. Ele regula a corrente de carga para aumentar gradualmente o SoC da bateria até atingir 80%, momento em que a corrente diminui para próximo de zero. Isso evita danos à bateria ao limitar o aumento de tensão além do necessário.

Quando a bateria atinge mais de 80% de SoC, o controlador de tensão entra em ação. Ele mantém a tensão ideal na bateria para evitar sobrecargas, garantindo seu estado operacional seguro e prolongando sua vida útil.

Este processo de controle garante que a bateria seja carregada de forma eficiente e segura, otimizando o desempenho e a durabilidade do sistema de armazenamento de energia.

Figura 35 – Fluxograma do Controle PI no Carregamento de Baterias



Fonte: Proprio autor.

### 3.8 Considerações finais

Este capítulo aborda a implementação e a metodologia para o carregador de baterias utilizando o conversor CC-CC tipo Buck, com foco no desenvolvimento de um sistema robusto e eficiente. Ao utilizar o software Simulink, o objetivo do projeto não é apenas aplicar os fundamentos da eletrônica de potência, mas também inovar em suas aplicações práticas.

O conversor Buck foi escolhido porque pode gerar uma saída mais baixa com uma tensão de entrada mais alta com alta eficiência. Ele foi examinado nos modos de condução contínua (MCC) e descontínua (MCD), juntamente com suas respectivas formas de onda e cálculos para dimensionar componentes passivos, como indutores e capacitores.

As equações fundamentais servem como base para a explicação do dimensionamento do indutor, que garante que a ondulação de corrente do indutor (21) permaneça dentro dos limites aceitáveis para que o conversor funcione corretamente. De forma semelhante, o dimensionamento do capacitor (20) foi feito para garantir que a tensão de ripple seja mantida sob controle para estabilidade do sistema.

O capítulo aborda a implementação prática do carregador proposto, incluindo teoria

e simulação do desempenho do conversor Buck em várias condições. Essa topologia foi escolhida porque é fácil de usar e funciona bem em carregadores de baixa potência.

Por fim, foram abordados conceitos cruciais como o estado de carregamento (SoC) e o estado de saúde (SoH) das baterias. Esses conceitos são essenciais para a supervisão e a gestão do sistema de armazenamento de energia. O SoH foi descrito como um indicador da capacidade restante da bateria em comparação com sua capacidade nominal, enquanto métodos de medição direta e baseados em corrente foram mencionados para estimar o SoC.

Este capítulo não apenas fornece uma base teórica para o projeto de um carregador de baterias, mas também estabelece os fundamentos para sua implementação real e monitoramento do estado das baterias utilizadas.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas no softwares *MATLAB* e *Simulink*.

#### 4.1.1 Especificações do projeto

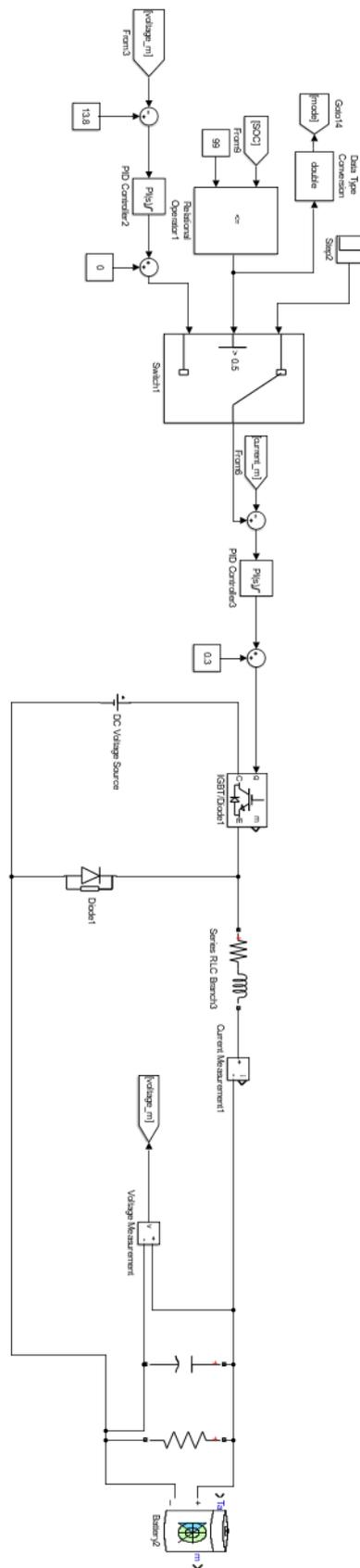
A Tabela 4 apresenta todas as especificações do sistema, fundamentais para os cálculos subsequentes.

Tabela 4 – Especificações do Sistema

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Descrição</b>
Tensão de Entrada $V_i$	48 V	Tensão de entrada
Corrente Nominal	40 A	Corrente nominal
Razão Cíclica $D$	0,27	Razão cíclica do conversor
Tensão de Saída $V_{out}$	12,8 V	Tensão de saída do conversor
Resistência de Saída $R_o$	0.32 $\Omega$	Resistência de saída
Indutância $L$	293 $\mu$ H	Indutância do conversor
Capacitância $C$	65,1 $\mu$ F	Capacitância do conversor
Modelo da Bateria	LiFeMgPO4	Tipo de bateria utilizada no sistema

Na Figura 36, é apresentado o circuito completo simulado no Simulink, utilizado para a extração dos resultados. Esta configuração permite uma análise detalhada do comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais. A simulação no Simulink oferece uma representação precisa do circuito, possibilitando a observação de variáveis críticas e o ajuste de parâmetros para otimização do desempenho.

Figura 36 – Circuito simulado no Simulink



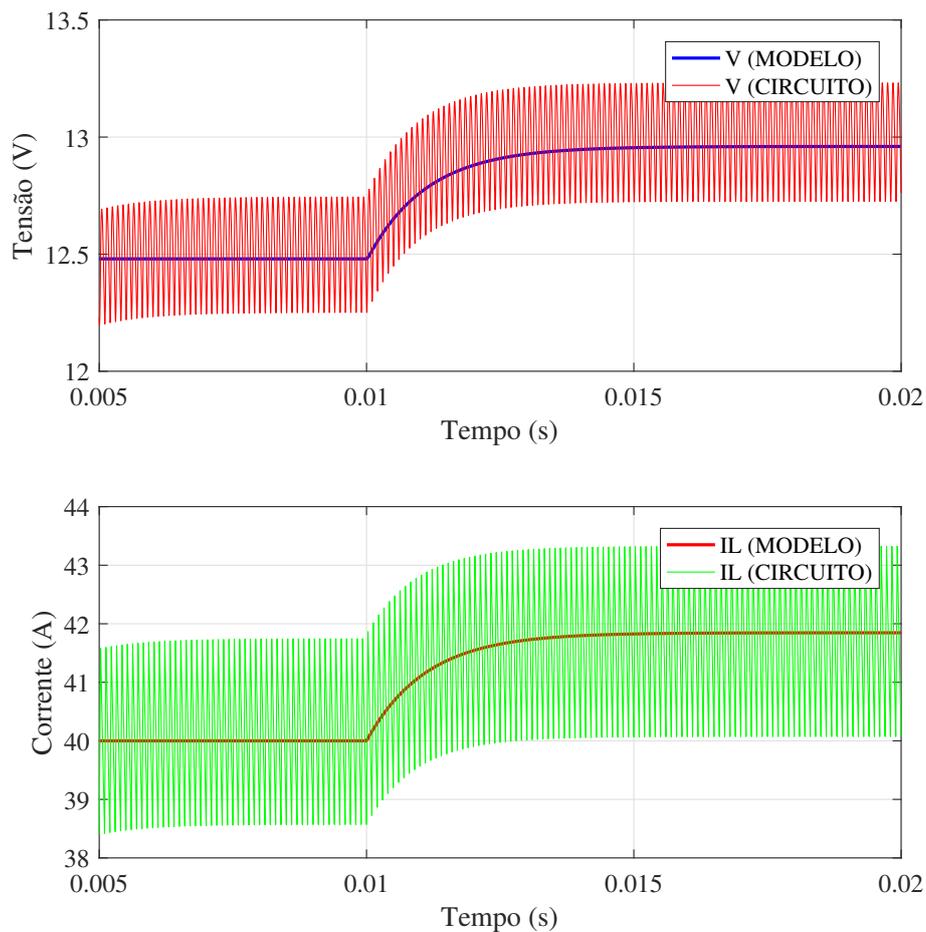
Fonte: Proprio autor.

## 4.2 Validação do modelo do conversor Buck

Para validar o modelo do conversor Buck desenvolvido, procedeu-se à comparação entre a corrente indutor do modelo comutado em malha aberta e a corrente do indutor do modelo de pequenos sinais, conforme descrito pela Equação (36). Uma comparação similar foi realizada para a tensão de saída, conforme especificado pela Equação (34). Ambas as comparações foram realizadas considerando uma carga nominal de  $0,312 \Omega$ , e os resultados estão representados na Figura 37.

Durante o processo de validação, foi aplicado um degrau de 0,01 à razão cíclica, que foi inicialmente ajustada para 0,26. Esta perturbação foi introduzida para observar a resposta dinâmica do sistema e verificar a conformidade entre os modelos analisados.

Figura 37 – Validação do modelo em malha aberta de corrente e tensão



Fonte: Proprio autor.

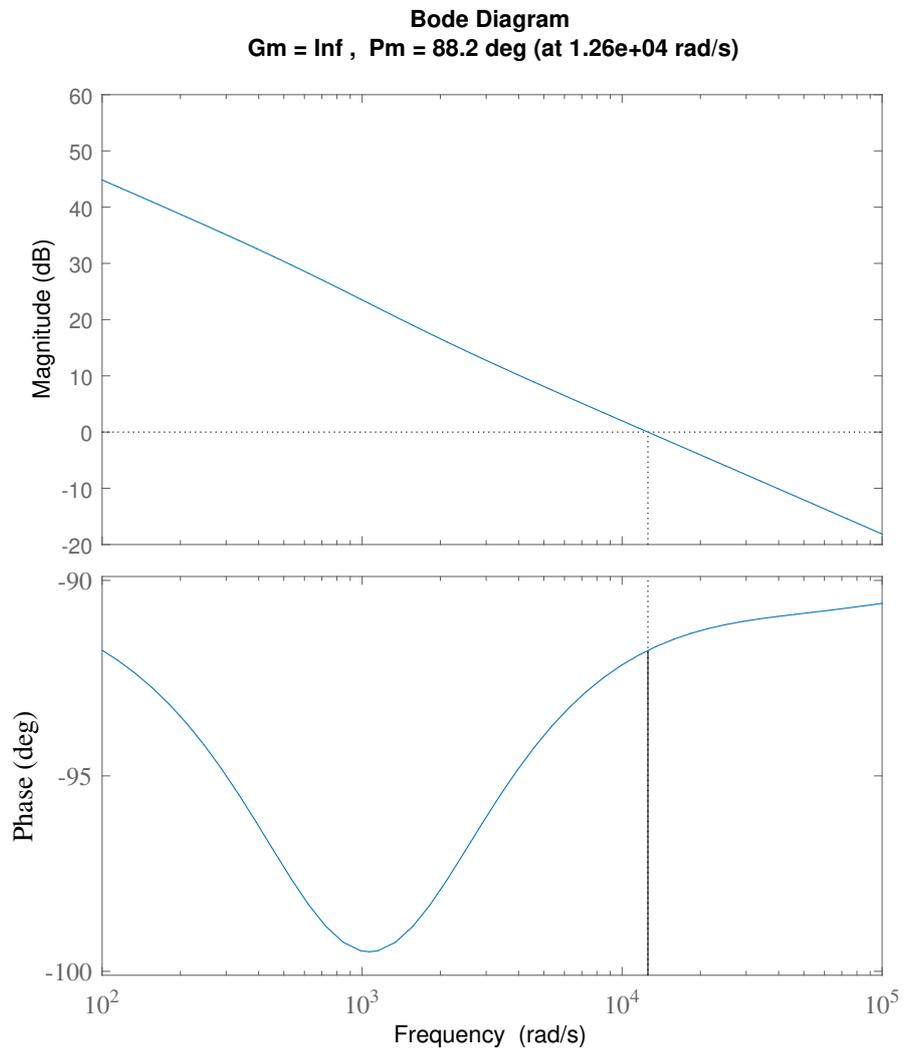
A partir da Figura 37 é possível inferir que existe uma correspondência entre as

respostas dinâmicas do modelo e do próprio conversor simulado no Simulink comprovando os métodos utilizados.

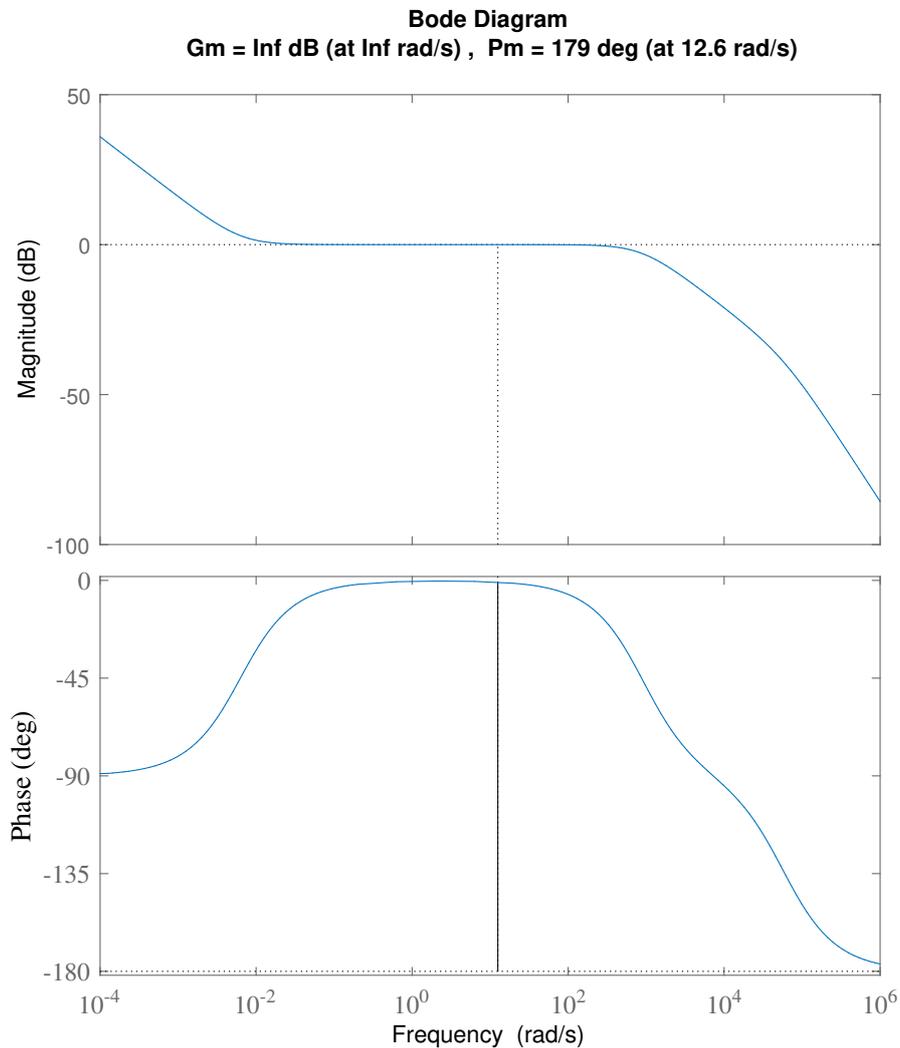
#### **4.2.1 Análise de desempenho e margens de estabilidade em malha fechada $G_{vd}$ e $G_{id}$**

A análise de desempenho e margens de estabilidade dos sistemas de controle é essencial para garantir que o projeto do conversor buck funcione de forma eficiente e segura. Em tal situação, as Figuras (38) e (39) permitem visualizar a resposta em frequência dos sistemas e avaliar suas características de estabilidade.

Esta análise visa garantir que o sistema funcione dentro de limites seguros e eficientes e fornecer uma compreensão abrangente do comportamento dinâmico do sistema em malha fechada. Esta abordagem é fundamental para o design e implementação de controladores que possam manter o desempenho e a estabilidade necessários para aplicações reais.

Figura 38 – Diagrama de bode  $G_{id}$ 

Fonte: Proprio autor.

Figura 39 – Diagrama de bode  $G_{vd}$ 

Fonte: Proprio autor.

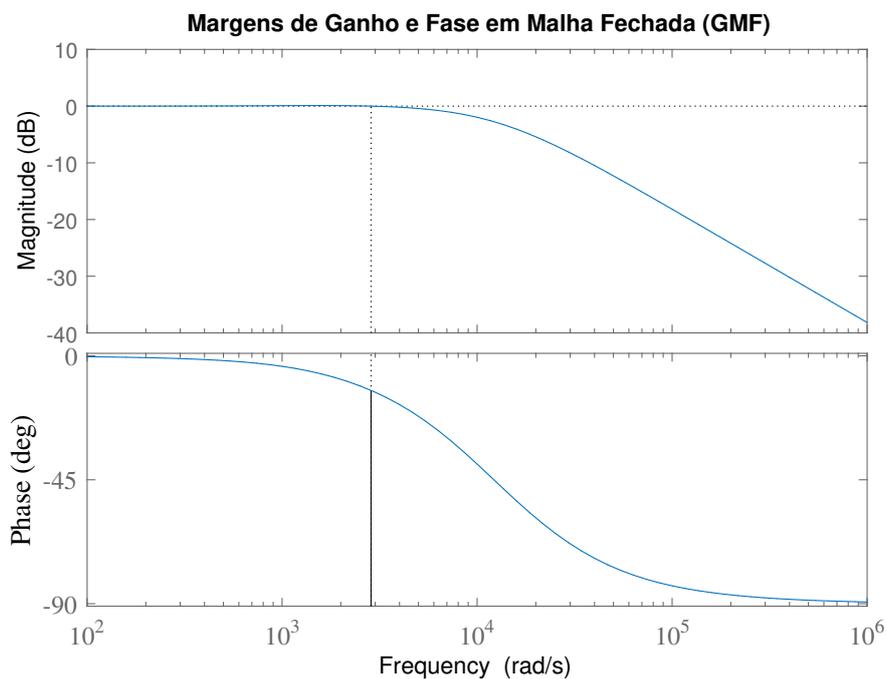
A análise das funções de transferência  $G_{vd}$  e  $G_{id}$  em malha fechada, juntamente com a construção dos respectivos diagramas de Bode, forneceu uma visão completa do desempenho e das margens de estabilidade do sistema em estudo. As equações. As funções de transferência  $G_{vd}$  e  $G_{id}$  são definidas pelas Equações (34) e (36) que foram essenciais para modelar a resposta do sistema e identificar pontos de ganho e fase críticos. Os diagramas de Bode mostraram as características de frequência do sistema e permitiram avaliar suas margens de ganho e fase. Isso forneceu indicadores claros da estabilidade e robustez do sistema.

### 4.3 Análise de Desempenho e Estabilidade de um sistema de controle no indutor em Malha Fechada

Após uma avaliação, a margem de ganho foi encontrada suficiente para garantir a estabilidade do sistema em face de variações nos parâmetros operacionais e de modelagem. Isso fornece uma reserva de estabilidade, protegendo o sistema contra dúvidas e mudanças no ambiente de operação.

A margem de fase foi avaliada como suficiente para garantir que o sistema não se torne instável devido a defasagens de fase excessivas ou defasagens de fase. Como demonstrado por esta análise, o sistema mantém uma resposta robusta e estável a perturbações e mudanças nas condições de operação. Na Figura 40 mostra a margem de ganho de corrente em malha fechada.

Figura 40 – Margem de ganho e Fase de corrente em malha fechada



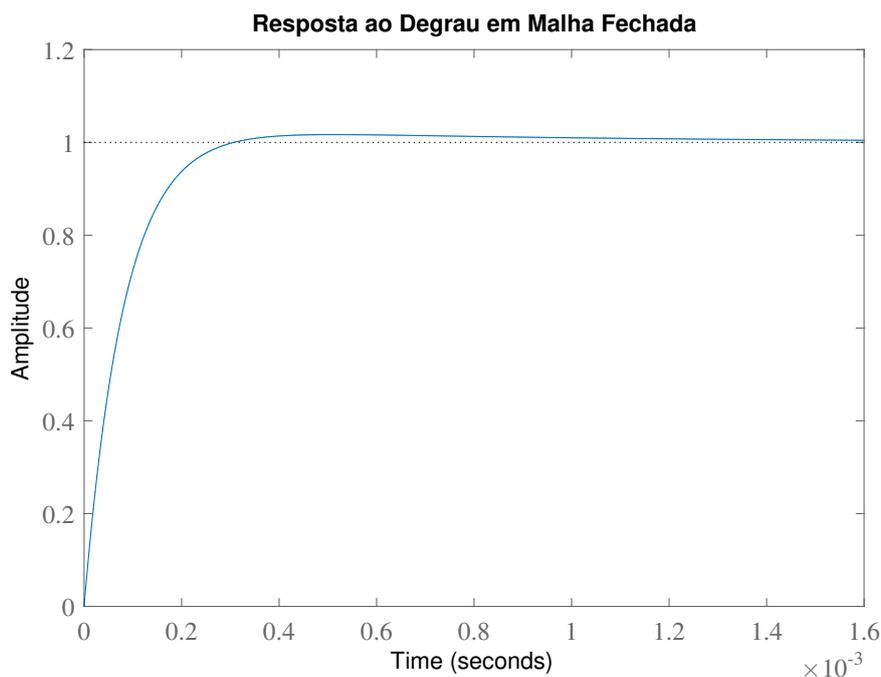
Fonte: Proprio autor.

A análise da resposta do degrau em malha fechada revelou que o tempo de assentamento estava dentro dos limites do sistema. Na amplitude 0.95 dá para observar o tempo de assentamento, obteve-se 0.2ms para o sistema convergir. Isso indica que o sistema atinge e se estabiliza em torno do valor de referência no prazo determinado pelo projeto.

Na resposta ao degrau em malha fechada, não foram observados picos iniciais sig-

nificativos acima do valor de referência. O sobressinal (overshoot) garante um desempenho consistente sem oscilações ou flutuações, mantendo-se dentro dos limites aceitáveis. Na Figura 41 mostra a resposta Degrau da corrente em malha fechada.

Figura 41 – Resposta em Degrau em malha de controle de corrente



Fonte: Proprio autor.

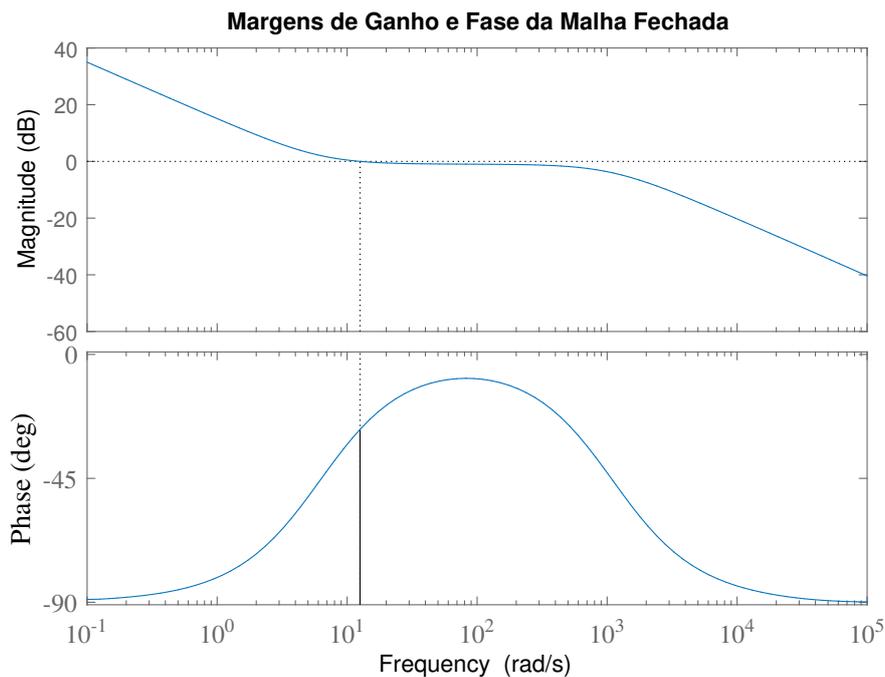
#### 4.4 Análise de Desempenho e Estabilidade do sistema de controle de tensão em Malha Fechada

Foi concluído que as margens de ganho e as fases do sistema são suficientes para garantir a estabilidade operacional em face de mudanças nos parâmetros de operação e modelagem. A margem de ganho fornece uma reserva sólida de estabilidade, garantindo que o sistema se comporte de forma consistente quando o ambiente operacional é incerto ou muda. Essa margem adicional de ganho garante uma resposta consistente e confiável, protegendo o sistema de variações significativas nos componentes.

A margem de fase foi considerada suficiente para evitar instabilidades causadas por defasagens excessivas. Este resultado mostra que o sistema é capaz de lidar com problemas e mudanças nas condições de operação. Esta análise mostra claramente que o sistema não apresenta oscilações indesejáveis causadas por defasagens de fase críticas e mantém

uma resposta dinâmica controlada. Na Figura 42 mostra a margem de ganho de tensão em malha fechada

Figura 42 – Margem de ganho e Fase de tensão em malha fechada

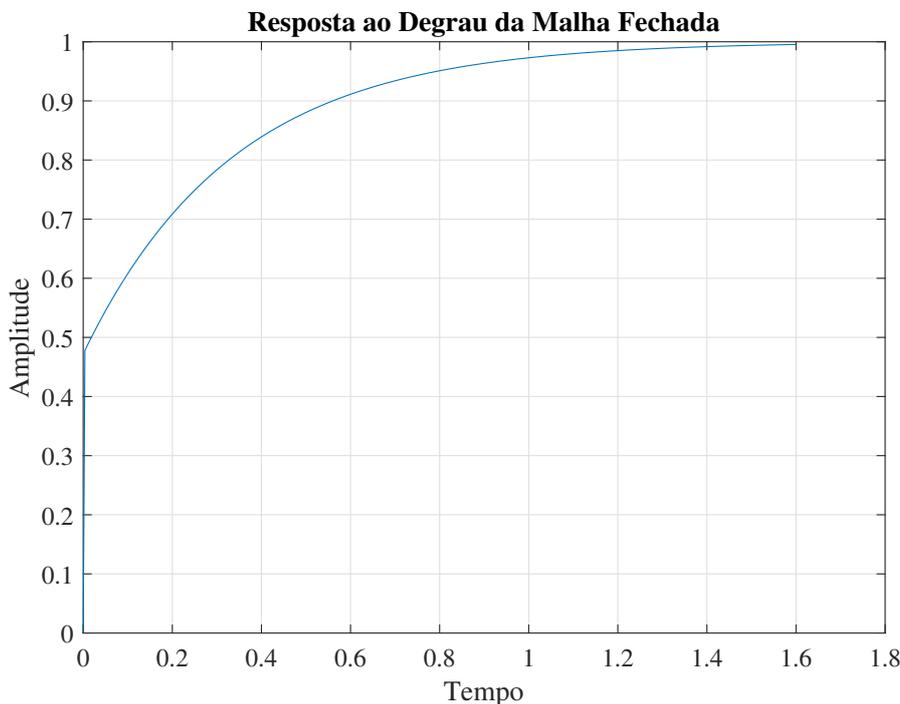


Fonte: Proprio autor.

A análise da resposta ao degrau de tensão de saída em malha fechada revelou que o tempo de acomodação está conforme esperado para o sistema. Observando a amplitude de 0.95 (5% dp valor final) o tempo de acomodação foi medido em aproximadamente 1 segundo, indicando que o sistema alcança e estabiliza em torno do valor de referência dentro do prazo estabelecido pelo projeto.

Não foram observados picos iniciais significativos acima do valor de referência na resposta ao degrau em malha fechada. Isso mostra que o sistema se comporta de maneira suave e estável. Isso é feito por meio de um sobressinal controlado que garante que o sistema funcione sempre de forma consistente, sem oscilações ou flutuações fora dos limites toleráveis. Esta função é essencial para garantir uma resposta precisa e dinâmica às mudanças nas condições operacionais e de carga. Na Figura 43 mostra a resposta Degrau da tensão de saída em malha fechada.

Figura 43 – Reposta ao Degrau da malha fechada de tensão e saída



Fonte: Proprio autor.

#### 4.5 Carregamento da bateria com conversor *buck*

Nesta seção será apresentado o carregamento da bateria de lítio, mais precisamente (LiFeMgPO<sub>4</sub>), modelo disponível no software *Simulink* e que possui uma tensão nominal de 12,8V e uma capacidade nominal de 40 Ah.

Através do software *Simulink* foi criado um modelo

Os resultados de uma simulação de 4500 segundos, ou aproximadamente 1 hora e 15 minutos, são mostrados nas Figuras (44), (45), (46). Elas mostram a tensão, a corrente, o estado de carga (SoC), o modo de operação e a razão cíclica do sistema do sistema. Para entender como o carregador e a bateria se comportam durante o ciclo de carga, é necessário analisar esses parâmetros.

Após a carga completa, a tensão da bateria se manteve constante. Esse comportamento garante a segurança do sistema e a longevidade da bateria. À medida que a bateria se aproxima da carga completa, sua corrente de carga, que inicialmente é alta (cerca de 40 A), diminuiu lentamente até aproximadamente 0,3 A. Essa redução na corrente é necessária para manter a tensão estável e evitar sobrecarga e aquecimento excessivo.

O Estado de Carga (SoC) mede a capacidade restante da bateria ao longo do tempo

e permite monitorar e controlar o processo de carga. O modo de operação mostra os estágios de carga rápida, lenta e manutenção da carga completa. Por fim, a razão cíclica, também conhecida como ciclo de carga, regula a quantidade de tempo em que o circuito de controle ativa a corrente de carga. Isso afeta diretamente a eficiência e a estabilidade do sistema de carregamento.

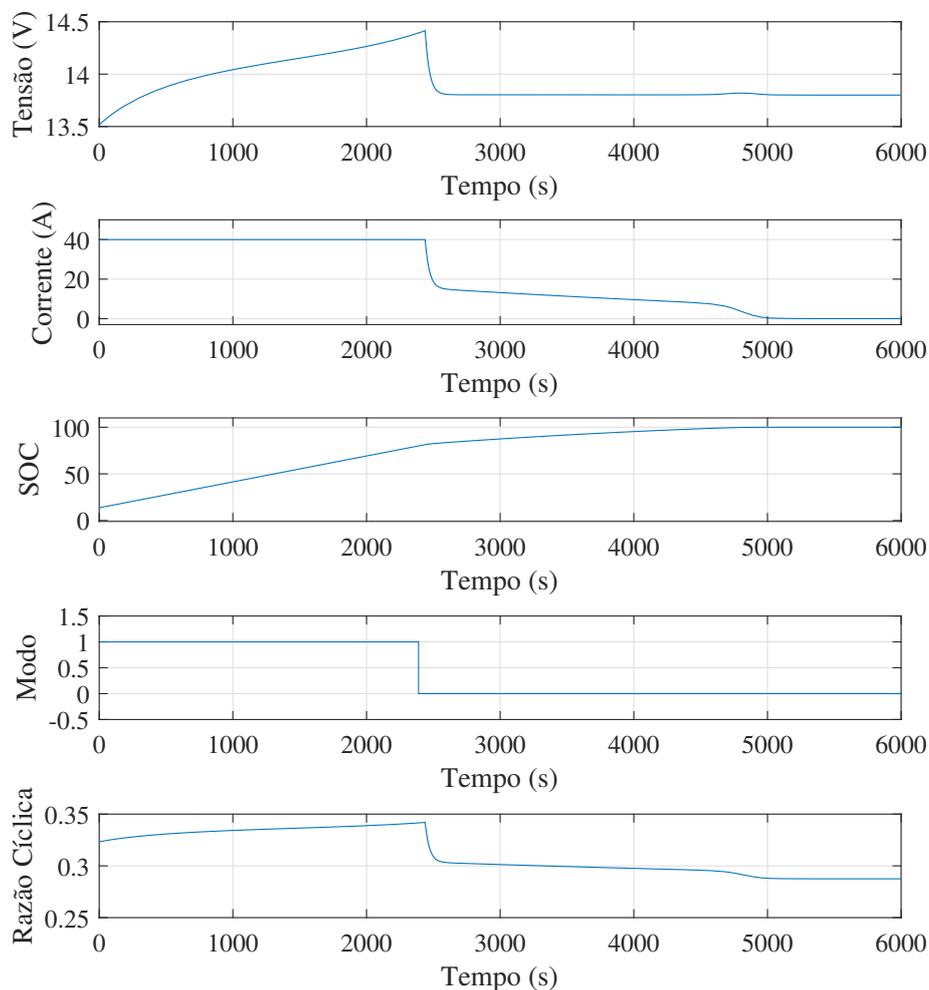
Os controladores PI que foram projetados, tanto de corrente e tensão atenderam as necessidades e conseguiram manter a corrente constante no processo de carga e elevando a tensão até seu ponto desejado e após isso mante-la constante após a carga chegar a 100%.

#### **4.5.1 Processo de Carregamento com 20% de Estado de Carga (SoC) Inicial**

Segundo (BATTERY, 2021), o Estado de Carga (SoC) mínimo recomendado para baterias de íons de lítio é de 20%. Descarregar a bateria abaixo desse valor pode acelerar a degradação e reduzir a vida útil da mesma.

Na Figura 35, é possível analisar o comportamento de todos os parâmetros mencionados anteriormente. A tensão e a corrente estão consistentemente dentro dos limites especificados para a bateria utilizada, conforme ilustrado.

Figura 44 – Carregamento da bateria iniciado com 20% de SoC



Fonte: Próprio autor.

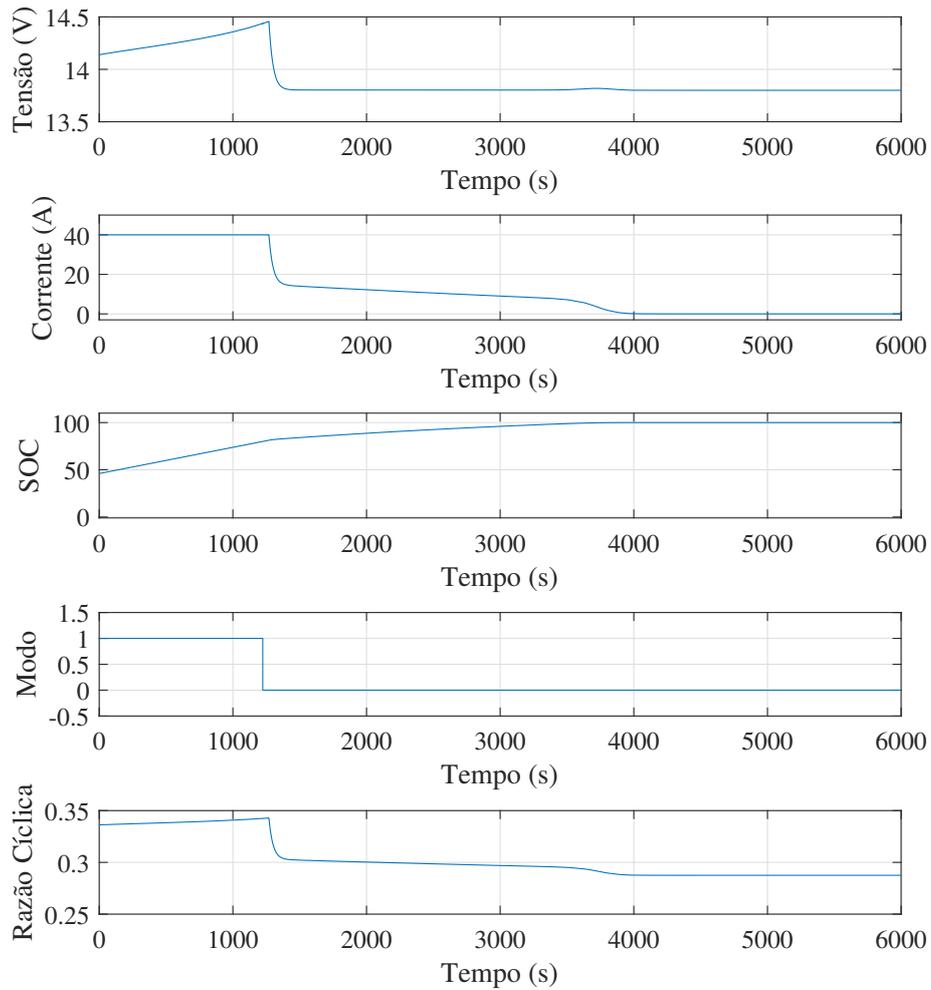
#### 4.5.2 Processo de Carregamento com 50% de Estado de Carga (SoC) Inicial

O controlador PI entra em operação para gerenciar o processo de carregamento da bateria de forma eficaz quando o carregamento é iniciado com um estado de carga (SoC) de 50%. Ao longo desta fase intermediária, a corrente de carregamento é elevada para maximizar a taxa de carregamento. A tensão aumenta lentamente até atingir o ponto de tensão constante.

O controlador de corrente ajusta a corrente de carregamento para manter a tensão estável à medida que a tensão se aproxima do valor nominal. Para evitar a sobrecarga da

bateria e garantir que funcione de forma eficiente e segura, este controle preciso é essencial. Ao longo desse processo, a temperatura da bateria deve ser monitorada regularmente para evitar superaquecimento e danos potenciais.

Figura 45 – Carregamento da bateria iniciado com 50% de SoC

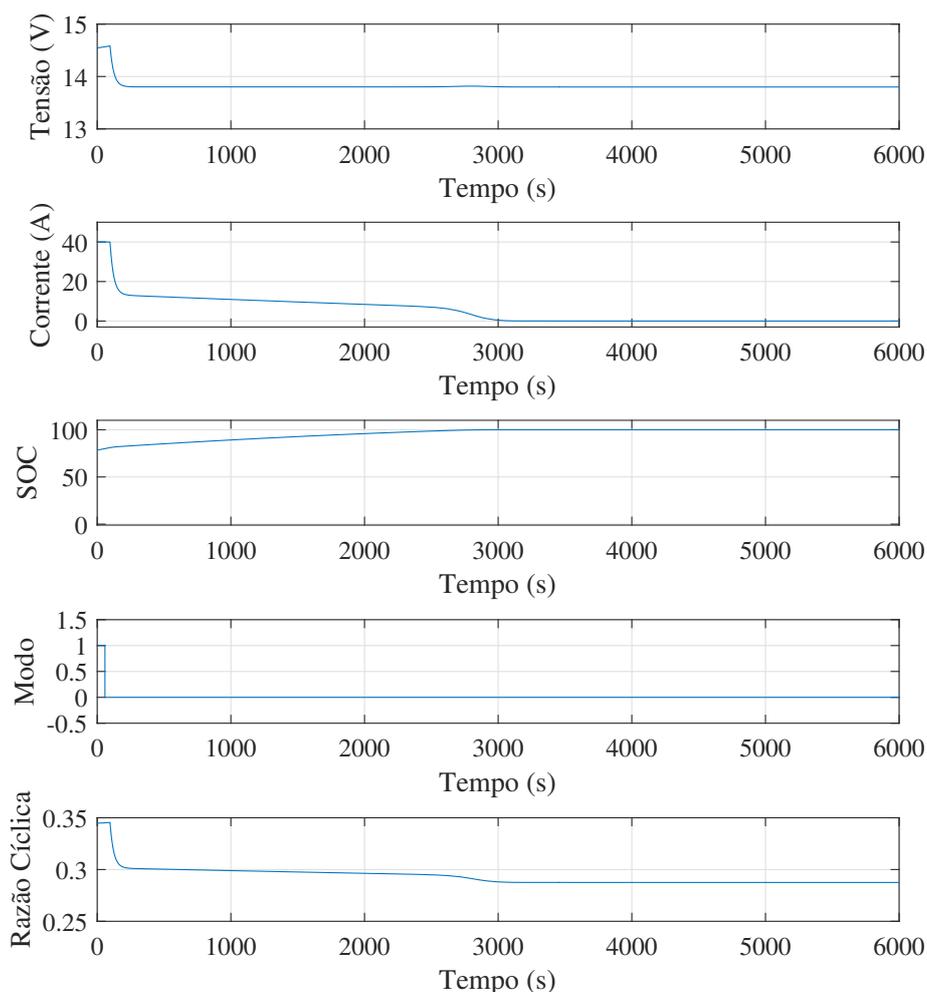


Fonte: Proprio autor.

#### 4.6 Processo de Carregamento com 80% de Estado de Carga (SoC) Inicial

O controlador de tensão é o controlador PI que deve atuar quando a bateria atinge um estado de carga (SoC) superior a 80%. A principal função do controlador de tensão neste estágio de carregamento é manter a tensão constante no valor nominal da bateria para garantir o carregamento seguro e eficiente. Ao longo desse tempo, à medida que a bateria atinge sua capacidade máxima, a corrente de carregamento deve diminuir lentamente até aproximadamente zero. Este controle preciso evita a sobrecarga e a degradação precoce da bateria. Isso garante uma vida útil prolongada da bateria e o melhor desempenho possível. Neste caso está sendo avaliado o comportamento da tensão.

Figura 46 – Carregamento da bateria iniciado com 99% de SoC



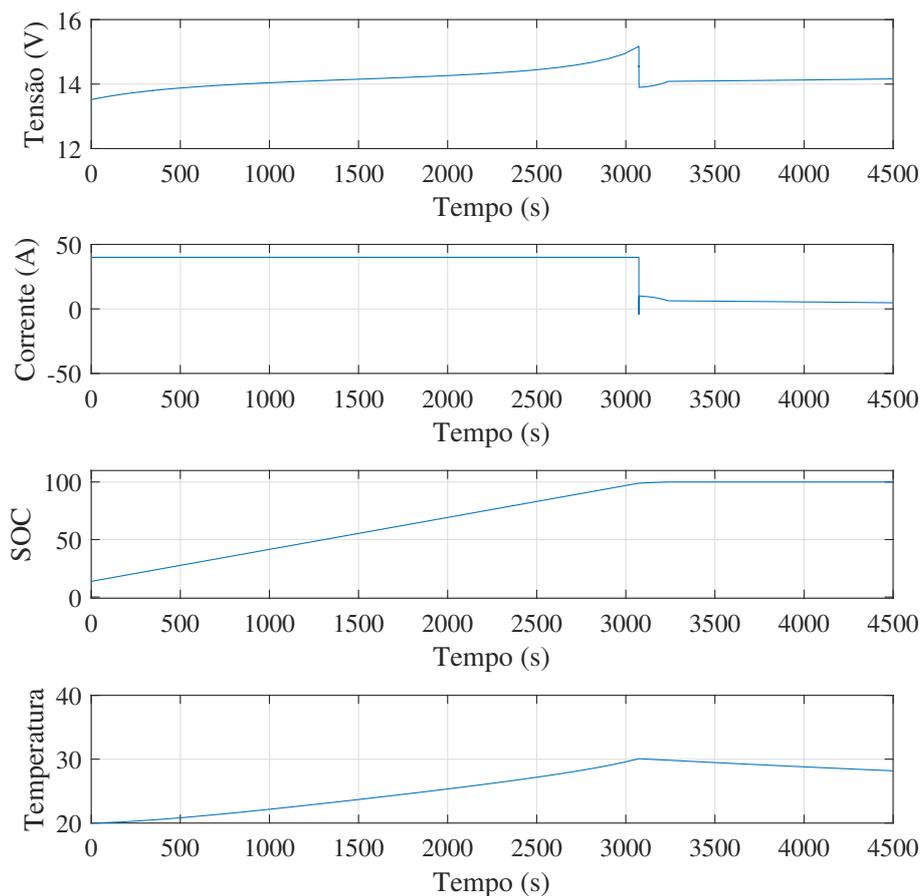
Fonte: Proprio autor.

#### 4.7 Amostragem do comportamento da temperatura

Segundo (WOLLINGER, 2020), a temperatura das baterias é um aspecto crucial a ser monitorado, especialmente em baterias de íon-lítio, devido à sua sensibilidade à temperatura, que afeta diretamente a vida útil e a segurança da célula. O processo de recarga de uma bateria de íon-lítio geralmente envolve dois estágios de corrente constante seguidos por um estágio de tensão constante.

Durante o carregamento da bateria, é essencial que todo o processo ocorra em uma temperatura próxima a 25°C, idealmente. A Figura 47 abaixo ilustra o processo de recarga de uma bateria de LiFeMgPO<sub>4</sub> modelada no Simulink.

Figura 47 – Temperatura do carregamento da bateria



Fonte: Proprio autor.

Na Figura 47, observamos o ciclo de recarga da bateria, iniciando em 20% de State of Charge (SoC) e alcançando 100%. A Figura 47 mostra a evolução da tensão, corrente,

SoC e temperatura ao longo do processo de recarga.

A simulação foi conduzida ao longo de 7000 segundos (aproximadamente duas horas). Observou-se que, neste modelo, a temperatura máxima atingiu 30°C quando a carga atingiu 100%, diminuindo para 25°C após a bateria alcançar e manter o SoC em 100%. Esse comportamento está alinhado com os padrões encontrados na literatura especializada, evidenciando a adequação do carregador às condições ideais de operação.

#### **4.8 Considerações Finais**

Este capítulo apresenta os resultados das simulações realizadas para o sistema de carregamento de bateria usando um conversor *buck* pelo software MATLAB e *Simulink*. Os cálculos e simulações realizados dependeram das especificações detalhadas do sistema, que forneceram uma base sólida para a análise dos resultados. A validação do modelo do conversor mostrou que havia uma correspondência satisfatória entre as simulações e os resultados previstos.

Os processos de carregamento da bateria iniciados em vários estados de carga (SoC) foram examinados minuciosamente. Observa-se que, durante todo o processo, o sistema de controle PI projetado manteve a corrente e a tensão de saída estáveis. Isso garantiu a carga segura e eficiente da bateria de  $\text{LiFeMgPO}_4$ . A análise de desempenho e estabilidade em malha fechada confirmou que o sistema responde bem às variações de carga e mantém tempos de resposta adequados sem oscilações indesejáveis.

A análise de temperatura realizada durante o processo de carregamento revelou que o sistema manteve as temperaturas ideais para segurança e longevidade da bateria. Conforme demonstrado nas simulações, a aplicação de controles adequados de corrente e tensão aumentou significativamente o sucesso do carregamento.

Assim, os resultados mostram que o sistema proposto para o carregamento de baterias de íons de lítio é viável e eficaz, e destacam que ele é útil e atende às especificações do projeto.

Esta conclusão sintetiza os principais resultados do estudo e destaca a robustez do sistema de carregamento e sua capacidade de atender aos padrões de desempenho e segurança estabelecidos.

Esta conclusão reúne os tópicos principais discutidos neste capítulo e enfatiza a robustez do sistema de carregamento e sua capacidade de atender aos padrões de desempenho e segurança estabelecidos.

## 5 CONCLUSÕES

Este projeto detalha o desenvolvimento e a simulação de um sistema de carregamento de baterias de íons de lítio utilizando um conversor CC-CC Buck. Este trabalho é particularmente relevante no contexto atual, devido à crescente utilização de baterias de íons de lítio em dispositivos móveis, veículos elétricos e outras aplicações.

O MATLAB/Simulink foi utilizado como ferramenta para criar um modelo de simulação do carregador. Os resultados da simulação confirmaram que os dados teóricos estavam altamente correlacionados. A eficácia do conversor Buck em manter as características de saída pretendidas foi confirmada por uma análise das formas de onda de corrente e tensão. Além disso, foi utilizado um sistema de controle proporcional-integral (PI) para controlar a corrente e a tensão de saída do carregador. A resposta do sistema à malha fechada foi satisfatória, com margens de ganho e fase adequadas para garantir um desempenho sólido. A eficácia do controlador PI em várias condições de operação foi confirmada por análises de resposta ao degrau e resposta de frequência.

O acompanhamento da temperatura das baterias durante o processo de carregamento para garantir é necessário que permaneça dentro dos limites seguros. Os resultados mostraram que o sistema de carregamento manteve as temperaturas em níveis aceitáveis, evitando que as baterias superaquecessem e prolongando sua vida útil. Além disso, foi realizado uma avaliação do desempenho do carregador partindo de condições iniciais distintas de operação e na modelagem das baterias. O sistema operou de forma adequada, demonstrando a desempenho e estabilidade do controle PI e a adequação da topologia do conversor Buck para essa aplicação.

Os resultados teóricos e de simulação, demonstraram a viabilidade do projeto para usos práticos. Isso foi alcançado por meio de uma análise das etapas de carregamento, desde o estado inicial de carga (SoC) até a carga total.

Este estudo contribui significativamente para a área de sistemas de carregamento de baterias, oferecendo uma abordagem técnica e bem fundamentada para o desenvolvimento de carregadores eficientes e seguros.

A utilização do MATLAB/Simulink como ferramenta de simulação permitiu a análise detalhada e precisa do comportamento do sistema de carregamento, oferecendo uma base sólida para futuros desenvolvimentos e otimizações. A implementação de um controlador PI demonstrou ser eficaz na manutenção da estabilidade e eficiência do carregamento, mesmo em condições adversas.

A aplicação prática e os testes realizados com baterias reais corroboraram os resultados teóricos, confirmando a viabilidade do sistema proposto.

Em conclusão, este trabalho não só demonstra a viabilidade técnica e a eficácia do carregador de baterias de íons de lítio desenvolvido, mas também fornece uma base robusta para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de sistemas de energia. A abordagem metodológica adotada e os resultados obtidos destacam a importância de um design bem fundamentado e de um controle preciso para o desenvolvimento de soluções de carregamento de baterias eficientes e seguras.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. [S.l.: s.n.], 2009.
- ASSIS, B. G. D. **CARREGADOR DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO BASEADO NAS TOPOLOGIAS VOLTAGE SOURCE INVERTER (VSI) E BUCK**. [S.l.: s.n.], 2021.
- BATTERY, U. **How to Store Batteries**. 2021. Disponível em: <<https://batteryuniversity.com/articles>>.
- BEKAERT, E. **SECOND LIFE BATTERIES FOR A SUSTAINABLE ENERGY TRANSITION**. 2022. Disponível em: <<https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-second-life-battery#:~:text=Second20life20batteries20are20ones,serviceso20the20electricity20network.>>
- BERNDT, D. **Electrochemical Energy Storage**. [S.l.]: CRC Press, 2009.
- CAETANO, J. V. A. **Carregadores de Veículos Elétricos e Seu Impacto na Qualidade da Energia Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2021.
- CANTU ALINE KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA, M. B. M. H. A. M. F. G. D. O. d. S. R. R. V. Z. Comparativo técnico entre bancos de baterias de primeira e segunda vida para aplicação on-grid de porte comercial. **Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil**, 23 2022.
- CANTU ALINE KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA, M. B. M. H. A. M. F. G. D. O. d. S. R. R. V. Z. Comparativo técnico entre bancos de baterias de primeira e segunda vida para aplicação on-grid de porte comercial. **Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil**, 23 2022.
- CUNHA, V. A. G. D. **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CARREGADOR DE BATERIA DE ALTA TENSÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS BASEADO NO CONVERSOR BOOST EM MEIA PONTE SEM DIODOS DE RETIFICAÇÃO**. [S.l.: s.n.], 2021.
- ENELX. **What is a second life battery?** 2022. Disponível em: <<https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-second-life-battery#:~:text=Second20life20batteries20are20ones,services20to20the20electricity20network.>>
- EQUIPAMENTOS, S. **Por que o sistema de gerenciamento de bateria é parte importante da tecnologia de íons de lítio?** 2018. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/inovacao/baterias-ion-litio>>.
- ERICKSON, R. W. **Fundamentals of Power Electronics**. [S.l.]: Springer, 1999.
- FERREIRA, D. S. N. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS COMPUTACIONAIS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO**. [S.l.: s.n.], 2015.
- FERRO, J. da L. Carregador de baterias de Íon-Lítio para veículos elétricos integrado a geração fotovoltaica. **Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação e Sistemas – Fotovoltaica UFSC**, 04 2018.

FERRO, J. da L. **CARREGADOR DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO TRIFÁSICO DE 12 KW**. [S.l.: s.n.], 2018.

FILHO, G. J. L. **Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM**. [S.l.: s.n.], 2017.

FINK, M.; WIEDEMANN, U.; SCHATZ, R. **Battery Management Systems: Design by Modelling**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.

FISCH, C. M. e L. **Análise do conversor buck em consuação contínua**. 2018. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/analise-do-conversor-buck-em-mcc/>>.

FISCH, C. M. e L. **Modelo Dinâmico do Conversor Buck**. 2018. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/modelagem-dinamica-do-conversor-buck/>>.

IBERDROLA. **As baterias de íon de lítio, fundamentais para o armazenamento de energia**. 2022. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/inovacao/baterias-ion-litio>>.

KG, E. E.-A. G. . C. **Testing for Second-Life use**. 2022. Disponível em: <<https://elektroautomatik.com/en/industries/battery-recycling/second-life/>>.

KIEHNE, H. **Battery Technology Handbook**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

LAFUENTE, C. O. **Carregador de baterias monofásico para aplicação em veículos elétricos**. [S.l.: s.n.], 2011.

LAZZARIN, T. B. **TESE DO ESTUDO E IMPLIMENTAÇÃO DE UM CARREGADOR DE BATERIAS COM UMA TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE SUA VIDA ÚTIL**. [S.l.: s.n.], 2006.

LINDEN, T. B. R. D. **HANDBOOK OF BATTERIES**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

LINDEN, T. B. R. D. **HANDBOOK OF BATTERIES**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

MICHELINI, E. **BATERIAS RECARREGÁVEIS PARA EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS**. [S.l.]: S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA., 2017.

MORAES, C. **Análise do conversor buck em condução descontínua**. 2018. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/analise-do-conversor-buck-em-conducao-descontinua/>>.

NEOCHARGE. **Bateria de um Veículo elétrico**. 22. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>>.

NICOLLI, N. B. **CARREGADOR RÁPIDO DE BATERIA PARA BATERIA DE ÍON-LÍTIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS**. [S.l.: s.n.], 2019.

OLIVEIRA, J. H. D. **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CARREGADOR DE BATERIA ATRAVÉS DO CONTROLE DE UM CONVERSOR BUCK**. [S.l.: s.n.], 2014.

OLIVEIRA, R. J. D. **Materiais híbridos de polifosfatos: fotoquímica, caracterização (di)elétrica e sua utilização em capacitores eletroquímicos**. [S.l.: s.n.], 2008.

RONTEK. **CONCEITOS BÁSICOS SOBRE BATERIAS RECARREGÁVEIS**. 2020. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-recarregaveis-em-geral/conceitos-basicos-sobre-baterias-recarregaveis>>.

RONTEK. **A HISTÓRIA DAS BATERIAS**. 2022. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/informacoes-basicas/a-historia-das-baterias>>.

SILVA, C. T. D. **Baterias de Níquel-Metal Hidreto**. 2021. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/baterias-de-niquel-metal-hidreto/>>.

STA-ELETRONICA. **SISTEMA DE GERENCIAMENTO D BATERIAS(BMS)**. 2024. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/informacoes-basicas/sistema-de-gerenciamento-de-bateria-bms>>.

TOLL, M. **DIY Lithium Batteries How To Build Your Own Battery Packs**. [S.l.]: Toll Publishing, 2017.

WOLLINGER, L. **Baterias de Lítio-Íon: Um guia completo**. 2020. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/baterias-de-litio-ion-um-guia-completo/>>.

WORKS, S. **Flywheel (Volante de Inércia)**. 2023. Disponível em: <<https://www.skyworks.com.br/glossario/o-que-e-flywheel-volante-de-inercia/>>.

YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 5, p. 2151–2169, 2013.

ZHAO, L.; CHEN, Y. Least-squares based coulomb counting method and its application for state-of-charge (soc) estimation in electric vehicles. **International Journal of Energy Research**, 2016.